

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

621.1
ИЗ9

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

М. А. ИЗЮМОВ, П. В. РОСЛЯКОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГОРЕЛОК



КХ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

М.А.ИЗЮМОВ, П.В.РОСЛЯКОВ

Утверждено
учебным управлением МЭИ
в качестве учебного пособия
для студентов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГОРЕЛОК

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

по курсу

Парогенераторы

Редактор Т.В.Виленский

Издательство МЭИ

Москва

1990

УДК: 621.182-693.1.001.24 (075.8)

Проектирование и расчет горелок. Изюмов М.А., Росляков П.В.
/Под ред. Т.В.Виланского. - М.: Изд-во МЭИ, 1990. - 115 с.

Приведен анализ современных конструкций горелочных устройств для сжигания твердых топлив на ТЭС. Рассмотрено влияние компоновки горелок и тепловых характеристик топок на эффективность сжигания топлива. Изложены процессы образования токсичных окислов азота при сжигании органических топлив и перспективные способы сокращения их выбросов в атмосферу.

Приведена методика расчета выбросов оксидов азота.

Предназначено для студентов специальности котло- и реакто-роостроения энергомашиностроительного факультета.

Рецензенты:

докт.техн.наук проф. В.П.Глебов,

докт.техн.наук проф. А.Д.Трухний

ВВЕДЕНИЕ

Задача выбора технологической схемы сжигания топлива является одной из основных при проектировании паровых котлов ТЭС. Зачастую от правильности принятого решения зависит не только работа топки, но и котла в целом.

К принципиальным моментам проектирования котлов, работающих на твердом топливе, следует отнести выбор способа шлакоудаления и типа горелок, их компоновки. Надежность и эффективность работы топки по устойчивости горения, лучшему использованию топлива должна быть обеспечена как на базовом режиме нагрузки, так и во всем рабочем диапазоне изменения паропроизводительности котла.

С каждым годом проблема использования твердого топлива для производства электрической энергии и тепла будет обостряться из-за экологических проблем, возникающих при его использовании.

В настоящее время существует настоятельная необходимость в техническом перевооружении отрасли. Проекты новых и реконструируемых ТЭС должны предусматривать эффективные способы ограничения вредных выбросов в атмосферу. Наиболее распространенными среди них являются методы подавления образования токсичных продуктов сгорания непосредственно на стадии сжигания топлива, которая в значительной степени определяется конструкцией горелочных устройств.

Поэтому разработка и внедрение оптимальных конструкций горелок позволяет существенно снизить негативное влияние ТЭС на окружающую среду при одновременном повышении эффективности использования органического топлива.

1. ВЫБОР СПОСОБА ШЛАКОУДАЛЕНИЯ

1.1. Общие положения

В настоящее время подавляющая часть паровых котлов, работающих на твердом топливе, имеет факельный способ сжигания. Пылевидные частицы угля, взвешенные вместе с окислителем через горелку в топку, сгорают в ее объеме во взвешенном состоянии. Негорючая минеральная часть топлива в большей своей массе ($Q_{ун} A^P$) уносится продуктами сгорания в газоходы котла, образуя так называемую летучую золу уноса (рис. 1.1). Оставшаяся доля золы частично сепарируется в нижней части топки ($Q_{шл} A^P$), откуда попадает в шлакоприемник, а частично оседает на поверхностях экранов ($Q_{шл}^3 A^P$). Нормальная работа любого топочного устройства возможна, если во времени значение $Q_{шл}^3 A^P$ не будет увеличиваться, т. е. будет соблюден принцип поточности, при котором

$$A^P = Q_{шл} A^P + Q_{ун} A^P.$$

В противном случае прогрессирующее загрязнение экранов приведет к уменьшению их тепловосприятия и росту температур на выходе из топки $t_{г}''$ газов выше допустимых.

На поведение золы оказывает влияние ряд факторов:

- температурный уровень в топке, обусловленный тепловым режимом ее работы и свойствами горючей массы;
- время реагирования различных компонент золы топлива между собой при имеющемся в топке уровне температур;
- возрастание выхода шлака при увеличении концентрации реагирующих веществ;
- избыток воздуха α в зоне химического реагирования топлива.

Шлакоудаление в принципе может быть либо твердым (ТШУ), либо жидким (ЖШУ). В первом случае шлак попадает из топки в шлакоприемник в твердом, а во втором - в расплавленном состоянии. Агрегатное состояние шлака влияет на долю золы в уносе ($Q_{ун}$) и шлаке ($Q_{шл}$). При ТШУ $Q_{ун} = 0,95$, а $Q_{шл} = 1 - Q_{ун} = 0,05$. В случае ЖШУ доля золы в шлаке возрастает. Физически это объясняется различием в условиях организации горения и теплопередачи при ТШУ и ЖШУ.

При жидком шлакоудалении для уменьшения теплоотвода из зоны горения с целью получения высоких температур для расплава золы

экраны покрывают шпателями и наносят на них огнеупорную обмазку (рис. I.2), заметно снижая тем самым их тепловосприятие. Минеральная часть топлива находится в газовом потоке в расплавленном состоянии.

Попав на огнеупорную обмазку, частицы размытой золы налипают на нее, образуя слой. Постепенно толщина слоя становится такой, что создавшееся термическое сопротивление делает практически невозможным отвод от него теплоты в количестве, достаточном для затвердевания. На поверхности слоя появляется липкая шлаковая пленка, на которую продолжают оседать новые частицы. Эта пленка сохраняет текучее состояние, так как температура факела достаточно высока. Шлак стекает по стенам на слабонаклонный под и через летку попадает в шлакоприемное устройство, где охлаждается.

Наличие жидкой пленки способствует оседанию на ней большого количества частиц. Меняя условия аэродинамической организации процесса, можно влиять на величину $Q_{\text{шл}}$. Так, в призматических открытых топках (рис. I.3а) $Q_{\text{шл}} = 0,15$, а при концентрации сгорания основной массы топлива в ограниченном объеме (камере горения) и наличии в нем вихревого движения газов доля золы в шлаке возрастает (рис. I.3б, в). Как показывает практика, существует критическая величина $Q_{\text{шл}} \approx 0,5-0,6$. Ее превышение приводит к тому, что с летучей золой начинают уноситься лишь частицы очень мелких фракций. При этом их способность к налипанию на поверхности нагрева вне камеры горения резко возрастает. Осаждаясь на трубах поверхностей нагрева, частицы золы образуют плотный наружный слой отложений, препятствующий передаче теплоты рабочему телу, повышающий уровень температур по газовому тракту и увеличивающий его аэродинамическое сопротивление. Если загрязнение будет носить во времени прогрессирующий характер, то котел придется аварийно останавливать для очистки поверхностей нагрева.

В топках с ТЛУ, в отличие от топок с ЖЛУ, шлак удаляется в твердом состоянии. Достигается это путем применения экранов открытого типа, специальных решений по конструкции нижней части топки и аэродинамической организации процесса горения (рис. I.4). При открытых трубах величина воспринимаемой ими теплоты больше. Следовательно, охлаждение газов в зоне горения происходит интенсивнее, чем в топках с ЖЛУ. Следует по возможности исключить прямой удар факела в экран во избежание налипания на трубы частиц золы.

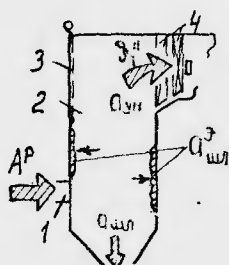


Рис.1.1. Схема распределения минеральной части в топке: 1-горелка, 2-топка, 3-экраны, 4-поверхности нагрева

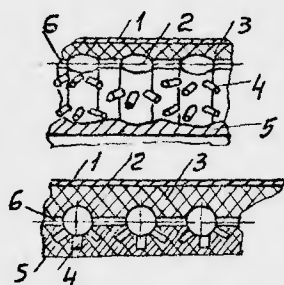


Рис.1.2. Экраны топки с МШУ: 1-обшивка, 2-труба экрана, 3-теплоизоляция, 4-жиры, 5-огнеупорная обмазка, 6 - проставка

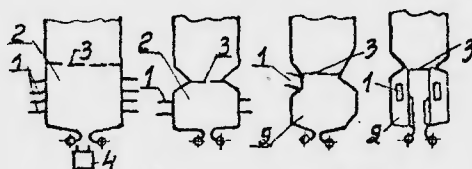


Рис.1.3. Схемы топок с МШУ: 1-горелка, 2-зона горения, 3-граница шихования, 4-шлакоприемник

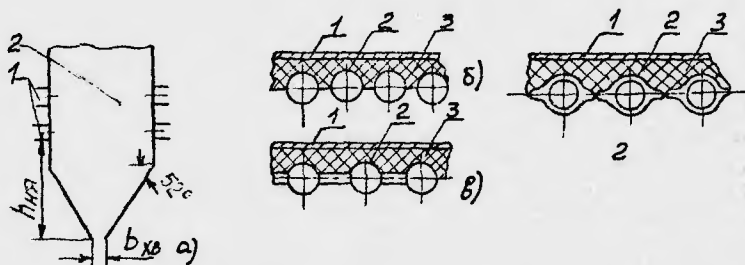


Рис.1.4. Схема топки с МШУ (а) и типов экранов (б-г): б-гладкотрубный; в,г- газоплотные с проставками и из плавниковых труб; обозначения см.рис.1.1, 1.2

В этом отношении конструкция экрана (рис. 1.4) типа "б" или "г" предпочтительнее, чем "а", так как последний имеет выходящую в топку обмуровку (теплоизоляцию), на которой оседание частиц будет происходить интенсивнее вследствие более высокой наружной температуры.

Нижняя часть топки под горелками имеет гораздо больший объем, чем в топках с ЖПУ (рис. 1.4а). Попавшие сюда газы с частицами золы интенсивно охлаждаются, что приводит к затвердеванию золы. Эту часть топки называют "холодной воронкой". Для облегчения выпадания частиц скаты экранов имеют угол наклона к горизонту не менее 52° . Ширина узкой части холодной воронки

$$b_{\text{хв}} = 1-1,2 \text{ м};$$

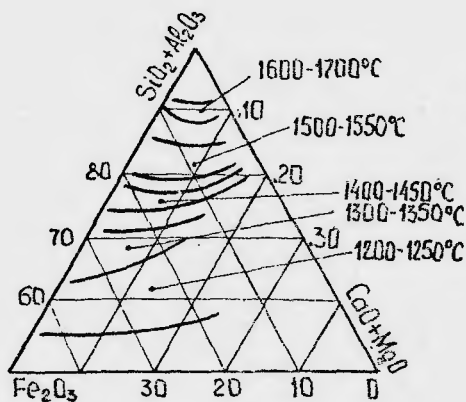
Для мощных котлов с паропроизводительностью $D \geq 1650$ т/ч число воронок равно 2, а расстояние от оси горелок нижнего яруса $h_{\text{нж}}$ до горловины принимается не менее 10 м. Естественно, что форсировка горения, т. е. количество теплоты, выделяемой в единице объема, для топок с ЖПУ меньше, чем для ЖПУ.

Основная проблема в работе топок с твердым шлакоудалением — исключить возможность загрязнения экранов в зоне горения и последующей части топки и обеспечить нужный уровень температур для стабилизации горения.

Выбор способа шлакоудаления является принципиальным и наиболее ответственным моментом при конструировании топки, особенно в тех случаях, когда возможны альтернативные варианты. Способ шлакоудаления оказывает значительное влияние не только на конструкцию топки, но и на сам котел и котельную установку в целом.

1.2. Факторы, влияющие на выбор способа шлакоудаления

Одним из свойств минеральной части золы, влияющей на ее поведение в топке, являются плавкостные характеристики и способность отдельных компонент реагировать между собой и окружающей средой. Существующие многокомпонентные диаграммы позволяют производить оценку температур плавления золы $t_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$ для кислых ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) и основных ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 < \text{MgO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$) шлаков (рис. 1.5); В табл. 1.1 приведены данные, характеризующие уровень температур минеральной части, при которых она сохраняет способность к налипанию на трубные поверхности нагрева. Отмечен ряд особенностей поведения минеральной части топлива.



Кислые шлаки:
 $Al_2O_3 + SiO_2 < Fe_2O_3 + MgO + CaO$
 Основные шлаки:
 $Al_2O_3 + SiO_2 > Fe_2O_3 + MgO + CaO$

$$A = \frac{100}{100 - (K_2O + Na_2O + SO_3)}$$

$$CaO + MgO = (CaO + MgO)A$$

$$Fe_2O_3 = A \cdot Fe_2O_3$$

$$SiO_2 + Al_2O_3 = (SiO_2 + Al_2O_3)A$$

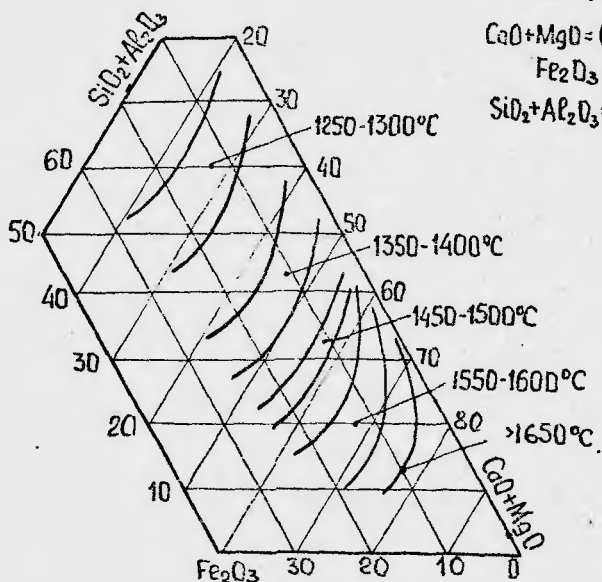


Рис. I.5. Диаграмма зависимости $t_{ж}$ от состава кислых (а) и основных (б) шлаков

Таблица I.I. Значения температуры $t_{3\text{AG}}$

Топливо	Характеристика отложений на трубах	Температура газов, при которой происходит загрязнение, °C
Донецкие типа АШ, ПА, Т	Рыхлые	1200
Донецкие Г, Д	Прочные	1100
Подмосковный, Б	Прочные	1100
Кизеловский, Г	Прочные	1100
Экибастузский $A^C=45-50\%$	Рыхлые	1200
$A^C=45\%$	Отсутствуют	1250
Назаровский, Ирша-бородинский, березовский	Прочные	1050
Кузнецкий, Г, СС	Рыхлые	1200
Ангренский, Б	Прочные	1050
Фрезерный торф	Прочные	1000
Сланцы северо-западных месторождений	Прочные	1000

Примечание: для топлив, не указанных в таблице, $t_{3\text{AG}} < t_1$, где t_1 - температура начала деформации минеральной части топлива.

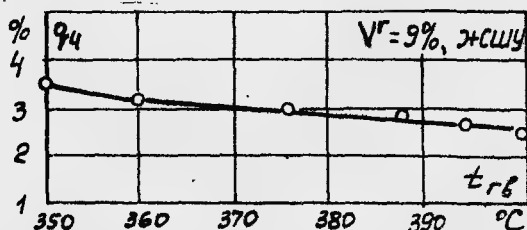


Рис. I.6. Зависимость Q_4 от температуры горячего воздуха $t_{гв}$

1. При наличии в факеле чисто окислительной или чисто восстановительной ($\alpha > 1$) среды и высоких температур T_f образуются эвтектические соединения с более высокой температурой плавления, чем их отдельные составляющие.
2. Наличие полувосстановительной среды ($\alpha < 1$) ведет к появлению эвтектик с низкими температурами плавления.
3. При твердом шлакоудалении наличие окислительной среды не может являться гарантом отсутствия шлакования, если при этом наблюдается динамическое воздействие факела на экран при температурах газов, превышающих $t_{заг}$.
4. В топках с ЭШУ помимо температуры плавления необходимо учитывать свойства текучести жидкого шлака. Работа топки может быть обеспечена только в условиях, когда наружная температура пленки шлака $t_{пл}$ больше температуры t_0 , ниже которой наступает потеря ее подвижности. Устойчивый выход жидкого шлака имеет место при температуре $t_{нж}$, отвечающей истинно жидкому или нормально жидкому состоянию шлака. Чем выше значение $t_{нж}$, тем сложнее, а в ряде случаев и технически невозможно осуществить жидкое шлакоудаление. При $t_{пл} = t_{нж}$ течение пленки подчиняется ньютоновским законам движения жидкости. Следует заметить, что дальнейшее повышение текучести пленки нежелательно, так как шлаки становятся химически активными по отношению к огнеупорной обмазке.

Текучесть шлака зависит от его вязкости μ . Для нормального шлакоудаления $\mu_{нж} = 20 \text{ Па}\cdot\text{с}$; верхний предел $\mu = \mu_0$, при котором начинается кристаллизация шлака, зависит от состава и свойств минеральной части. Для большинства топлив $\mu_0 = 25,0-30 \text{ Па}\cdot\text{с}$, а $t_0 = t_{нж} - (50-70)^\circ\text{C}$.

В топках с ЭШУ для получения нужного уровня температур факела T_f необходим высокий подогрев воздуха, что влечет за собой усложнение конструкции и увеличение металлоемкости воздухоподогревателя, а следовательно, и котла. Справедливости ради необходимо отметить, что высокий уровень подогрева окислителя требуется по условиям сушки топлива и в схемах прямого вдувания при сжигании углей с $W^P \geq 35\%$ и в топках с ТШУ. К положительным моментам высокого подогрева воздуха следует отнести снижение потерь от недожога (рис. 1.6). Кроме того, поднимается уровень температур по газовому тракту, что интенсифицирует процесс теплопередачи в поверхностях нагрева (растет температурный напор).

Увеличить температуру T_{ϕ} можно и за счет исключения подачи в зону горения водяных паров, выделившихся в процессе подсушки топлива. Адиабатная температура горения, $^{\circ}\text{C}$,

$$\delta_Q = Q_T / V_C \quad (I.I)$$

а следовательно, и температура факела T_{ϕ} при постоянном количестве вносимой теплоты в топку Q_T , КДж/кг , тем больше, чем меньше будет теплоемкость V_C продуктов сгорания (рис. I.7).

Исключить подачу водяных паров в зону горения можно, применяя центральные, разомкнутые или полуразомкнутые схемы пылеприготовления. Это усложняет котельную установку, увеличивает ее металлоемкость, повышает затраты на монтаж, собственные нужды, ремонт и эксплуатацию. Необходимо помнить, что в схемах с промбункером увеличение разрежения перед мельницей S_M'' может привести к увеличению потерь с механическим недожогом Q_4 (рис. I.8). Это увеличение будет тем заметнее, чем меньше выход летучих V^* . Рост S_M'' ведет к увеличению присосов в мельницу, повышая тем самым количество сушильного агента. При постоянстве избытка воздуха в топке α_T количество воздуха α_T в основных горелках будет падать. Изменение воздушного режима при уменьшении α_T или α_i ведет к увеличению Q_4 за счет ухудшения перемешивания (рис. I.9). Попытки скомпенсировать нехватку окислителя в горелках путем увеличения его подачи приведут к росту α_T . Механический недожог при этом начнет расти за счет снижения температуры факела, так как увеличение α_T эквивалентно увеличению V_C (см. (I.I)). К нежелательным последствиям независимо от способа шлакоудаления ведет и неравномерное распределение воздуха и топлива по отдельным горелкам (рис. I.10).

В топках с ТШУ за исключением многозольных топлив с $A^p_{\text{зольн}}/Q^p_{\text{н}} > 1,5$ (A^p - зольность, %; $Q^p_{\text{н}}$ - теплота сгорания, МДж/кг , рабочей массы топлива) потери с физической теплотой шлака отсутствуют:

$Q_6 = 0$. При ШПУ, а также в случае $A^p_{\text{зольн}}/Q^p_{\text{н}} > 1,5$ для ТШУ

$$Q_6 = C_{\text{шл}} A^p (ct)_{\text{шл}} / Q^p_{\text{н}},$$

где $C_{\text{шл}}$ и $t_{\text{шл}}$ - теплоемкость и температура шлака (ТШУ $t_{\text{шл}} = 600^{\circ}\text{C}$, ШПУ - $t_{\text{шл}} = t_3$); $Q^p_{\text{н}}$ - располагаемая теплота сгорания топлива;

t_3 - температура жидкоплавкого состояния золы. Во всех случаях

$$\Delta Q_6 = Q_{6, \text{жшл}} - Q_{6, \text{тшл}} > 0.$$

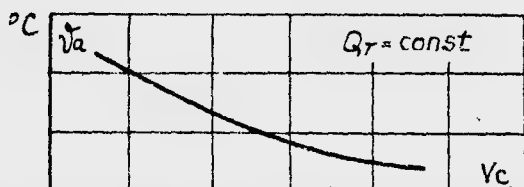


Рис. 1.7. Зависимость адиабатной температуры от V_c

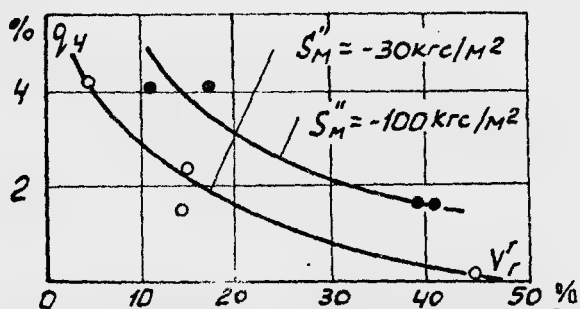


Рис. 1.8. Зависимость Q_4 от выхода летучих V_r и уровня разрежения перед мельницей (ШМ)

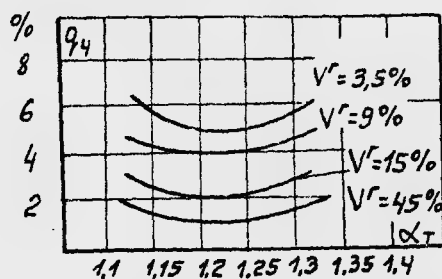


Рис. 1.9. Зависимость Q_4 от избытка воздуха α_T

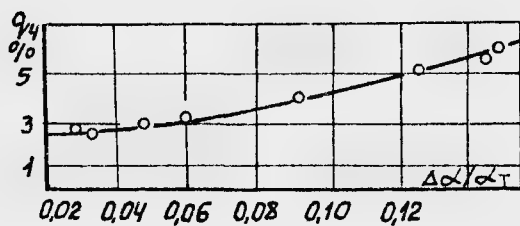


Рис. I.10. Зависимость q_4 от неравномерности распределения воздуха по горелкам

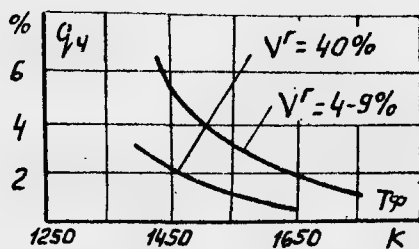


Рис. I.11. Зависимость q_4 от температуры факела T_ϕ

Как показывает практика, из-за более высокого уровня температур потери с механическим недожогом Q_4 в топках с ШТУ в среднем на 30% ниже, т.е.

$$\Delta Q_4 = Q_{4, \text{жгу}} - Q_{4, \text{тгу}} \approx -0,3 Q_{4, \text{тгу}}.$$

Для малореакционных топлив с $V_f < 10\%$ это различие может достигать до 50%.

При одинаковом уровне коэффициентов избытка воздуха и температур уходящих газов за котлом $Q_{\text{ух}}$ потери с уходящими газами

$$Q_{2, \text{тгу}} = Q_{2, \text{жгу}}.$$

Если же уровень подогрева воздуха при ТЛУ может быть принят меньше, то при $Q_{\text{ух}} = \text{const}$ может оказаться, что $Q_{2, \text{тгу}} < Q_{2, \text{жгу}}$. Практически это возможно лишь в том случае, если подогрев воздуха будет осуществлен вместо двух в одной ступени воздухоподогревателя.

Для разомкнутых схем пылеприготовления необходимо учитывать прямые потери топлива с уносом, которые могут достигать величины $Q_{4, \text{зн}} \approx 1\%$ и более.

В общем случае изменение КПД котла

$$\Delta \eta = \eta_{\text{жгу}} - \eta_{\text{тгу}} = -\Delta Q_6 + \Delta Q_4 + \Delta Q_2 - \Delta Q_{4, \text{зн}}.$$

Из представленного соотношения следует, что наибольший выигрыш при использовании ШТУ, с точки зрения экономии топлива, можно получить для сухих, малозольных, слабореакционных углей.

В этом случае $\Delta Q_4 = 0$, $-\Delta Q_4 + \Delta Q_6 > 0$, а применение разомкнутой схемы не обязательно.

Для слабореакционных топлив с выходом летучих $V_f \leq 15\%$ при понижении уровня температур факела T_f в зоне горения потери с механическим недожогом $Q_{4, \text{ж}}$ заметно возрастает (рис. I.11).

В топках с ТЛУ $Q_{\text{ух}}$ выше, чем при ШТУ. Увеличение концентрации золы в потоке газов ведет к более интенсивному износу поверхностей в газоходах особенно при сжигании абразивных топлив с высоким содержанием в золе SiO_2 . При постоянном значении КПД электрофильтра доля золы, выбрасываемая в атмосферу, в топках с ТЛУ больше. Наличие золы в продуктах сгорания сказывается на общем сопротивлении газового тракта и износе дымососа.

При прочих равных условиях из-за высокого уровня температур образование оксидов азота в топках с ШТУ больше (см. гл. 4).

Капитальные затраты и затраты на ремонт топок с ТЛУ (по сравнению с топками ШТУ), как правило, ниже.

В силу более высокого уровня температур газов в топках с ШТУ для выгорания топлива до нужных значений q_4 требуется меньшее время. Это позволяет в ряде случаев получать несколько меньшие габариты топок по объему и, следовательно, по высоте.

Уменьшение высоты топки ведет к уменьшению высоты здания котельного цеха ТЭС и снижению капитальных затрат на его сооружение.

Известно, что при снижении нагрузки на котле уровень температур газов в зоне горения понижается. Возникает ситуация, при которой получение жидкого шлака без применения специальных мер становится невозможным. Так, большинство топок с ШТУ по условиям надежного выхода шлака имеют нижний предел нагрузки не выше 70% от номинальной. У топок с ТЛУ эта величина определяется условиями обеспечения устойчивости процесса горения и составляет 50%. С этой точки зрения топки с твердым шлакоудалением следует признать более маневренными.

В СССР, согласно [1], топки с ШТУ применяют для сжигания мало-реакционных топлив типа АШ, Т, ПА, СС, а в ряде случаев бурых и каменных углей типа назаровского, ирта-бородинского, донецкого ГСШ, кузнецкого, имеющих "основной" состав шлака $(SiO_2 + Al_2O_3) / (Fe_2O_3 + CaO + MgO) < 1$, температуру нормального жидкого шлакоудаления $t_{нж} < 1450^\circ C$, вязкость шлака $\mu = 20 \text{ Па}\cdot\text{с}$ и теплоту сгорания $Q_{пн} \geq 16 \text{ МДж/кг}$.

Топки с ТЛУ рекомендуются [2] для сжигания бурых, каменных углей, фрезерного торфа, сланцев.

В альтернативных вариантах выбор способа шлакоудаления является технико-экономическим вопросом. По приведенным затратам $З_{\Sigma}$ экономически выгодным оказывается тот вариант, у которого сумма отдельных составляющих затрат: на топливо ($З_{тл}$), капитальное строительство, включая стоимость котла и системы пылеприготовления ($З_{кс}$), собственные нужды ($З_{он}$), ремонт и эксплуатацию ($З_{рем}$), экологию ($З_{эк}$) будет меньшей:

Контрольные вопросы к главе I

1% Почему в топках с ТЛУ $Q_{нж}$ меньше, чем при ШТУ?

2% В чем заключаются основные проблемы в работе топок с ТЛУ и ШТУ?

3% Почему в топках с ШТУ потери с q_4 меньше?

4% Назовите преимущества и недостатки топок с ТЛУ и ШТУ.

5. Какой способ шлакоудаления Вы выберете для следующих топлив: подмосковный Б, прша-бородинский Б, кузнецкий СС, АШ, экибастузский СС? Для каких из указанных топлив, в случае принятия ТШУ, Вы будете учитывать потери с Ц_6 ? Состав топлива возьмите по [3]:

2. ПЫЛЕУГОЛЬНЫЕ ГОРЕЛКИ

Горелками называют устройства, служащие для ввода в топку топлива и окислителя (воздуха), их перемешивания и обеспечения устойчивого воспламенения пылевоздушной смеси.

По аэродинамическому способу ввода компонентов горючей смеси пылеугольные горелки подразделяют на вихревые и прямоточные.

2.1. Вихревые горелки

Вихревые горелки являются наиболее распространенным типом горелок. Применяются для сжигания практически всех топлив, кроме фрезерного торфа.

Топливозвоздушная смесь (первичный воздух) и недостающий для горения окислитель (вторичный воздух) вводятся в объем топки через концентрические кольцевые каналы, будучи предварительно закрученными специальными устройствами - завихрителями. Направление крутки одинаково. Образующееся течение имеет две принципиальные особенности (рис.2.1):

- 1) сопоставимость по величине всех трех составляющих скорости: аксиальной (продольной) U_a , тангенциальной (окружной) U_τ и радиальной U_r ;
- 2) наличие центральной зоны рециркуляции газов, имеющей тороидальную форму.

При сильной закрутке потока возникают радиальные градиенты давления, обусловленные центробежным эффектом. Из упрощенного уравнения движения

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho \frac{U_\tau^2}{r}$$

следует, что в центральной части закрученного потока возникает область с давлением p ниже атмосферного.

Из опытных данных известно, что изменение по потоку максимальных значений продольной, тангенциальной скоростей и разре-

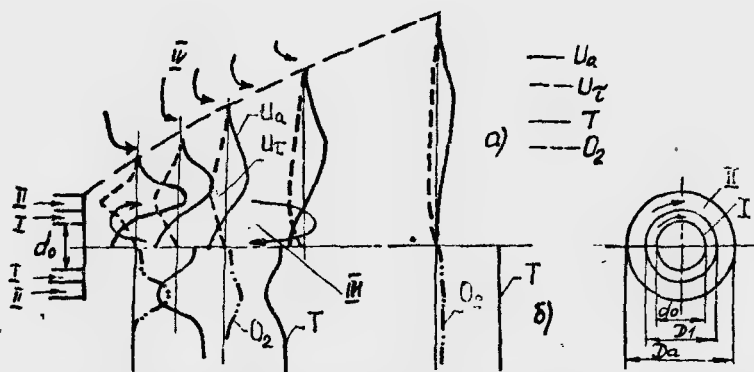


Рис.2.1. Распределение скоростей (а), температур и концентраций O_2 (б) в закрученной пылевоздушной струе: I-первичный, II-вторичный воздух, III-внутренняя зона рециркуляции, IV-продукты сгорания, эжектируемые по внешней поверхности

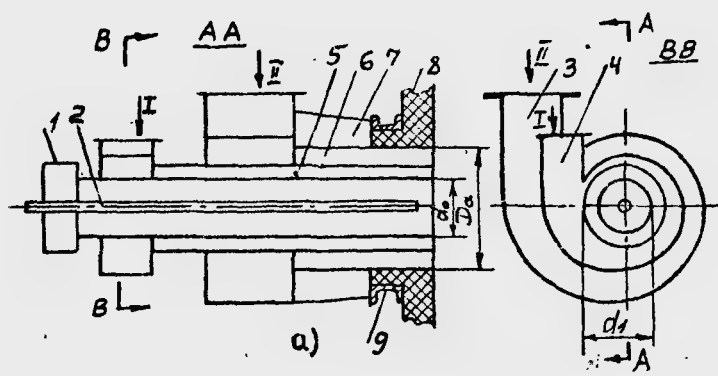


Рис.2.2 а

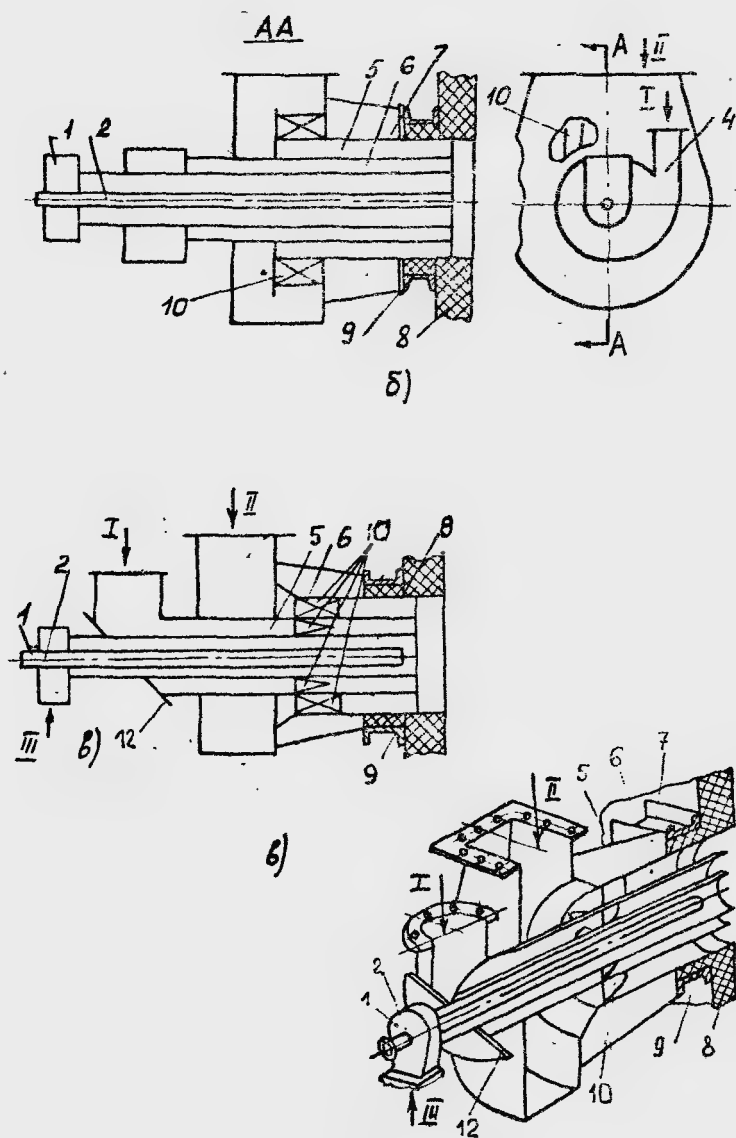


Рис. 2.2 б, в

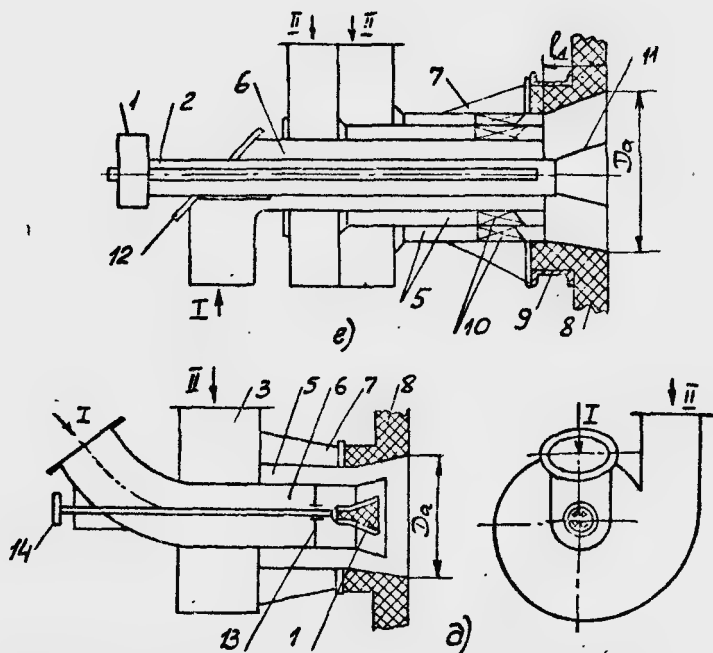


Рис.2.2. Конструктивные схемы вихревых горелок типа ГУУ (а), ГУЛ (б), ГЛЛ с двумя каналами по вторичному воздуху (в), ГЛЛ с двумя каналами по вторичному воздуху (г) и ГПУ (д):

I-канал для подачи центрального воздуха при работе на мазуте, 2-мазутная форсунка, 3,4-улитки вторичного и первичного воздуха, 5,6-кольцевые каналы первичного (I) и вторичного (II) воздуха, 7-ребра жесткости, 8-обмуровка, 9-элемент крепления горелки, 10 - аксиальный (в,г) или тангенциальный (б) закручивающий аппарат, II-рассекатель, 12-отбойная плита, 13-дистанционирующее устройство, 14-привод передвижения рассекателя

жения на оси ($p_{\infty} - p$) соответственно пропорционально X^{-1} , X^{-2} и X^{-4} , где X - расстояние от образурн горелки. Таким образом, уменьшение значения $\partial p / \partial r$ по X будет приводить к возникновению положительного продольного градиента давления $\partial p / \partial X > 0$. При наличии сильной закрутки и отсутствии ввода реагента через центральный канал этого оказывается достаточно для возникновения циркуляционной зоны с $U_a < 0$. Эта зона играет важную роль в стабилизации процесса горения. По существу ее можно рассматривать как своеобразный тепловой реактор, обеспечивающий постоянный подвод теплоты к топливовоздушной смеси.

Высокотемпературные продукты сгорания, смешиваясь с топливовоздушной смесью, создают условия, достаточные для устойчивого воспламенения топлива. Интенсивное перемешивание вторичного и первичного воздуха довольно быстро приводит к тому, что и на внешней границе струи создаются концентрационные условия, благоприятные для протекания химических реакций горения (рис.2.1).

Для придания потоку вращения используются улиточные, аксиально-лопаточные и тангенциально-лопаточные закручиватели. В соответствии с этим вихревые горелки подразделяют (рис.2.2) на улиточно-улиточные (ГУУ), улиточно-лопаточные (ГУЛ), лопаточно-лопаточные (ГЛЛ), прямосточно-лопаточные (ГПЛ) и прямосточно-улиточные (ГПУ). Первым после индекса (горелка) указывается тип закручивателя по первичному воздуху. В ряде случаев, о которых речь пойдет выше, первичный воздух подается по прямоточной схеме (П), т.е. без закрутки.

Живое сечение для прохода реагентов F_I и F_{II} , m^2 , определяется при их известных объемах V_I и V_{II} , m^3/c , по рекомендуемому числу горелок Z_r (см. табл.3.9) и допускаемым значениям скоростей W_I и W_{II} (табл.2.1):

$$F_I = \frac{V_I}{Z_r W_I} \quad (2.1)$$

Меньшие значения W_I и W_{II}/W_I для малореакционных топлив типа АШ, ПА, Т обусловлены стремлением к увеличению времени пребывания топлива в зоне горения. Горелки типа ГПУ имеют тепловую мощность до 30 МВт при $W_I = 18-20$ м/с и $W_{II}/W_I = 1,2-1,3$. Рост абсолютных скоростей при увеличении единичной тепловой мощности горелки Q_r , МВт, связан, во-первых, с получением приемлемых размеров горелки, так как число горелок увеличивается не прямо

Таблица 2.1. Скорость пылевоздушной смеси W_I и вторичного воздуха W_{II} при номинальной нагрузке для вихревых горелок типа ГУУ, ГУЛ, ГЛЛ и ГЛД

Топливо	Скорость	Способ шлакоудаления	Тепловая мощность горелки, МВт						
			15	25	35	50	75	100	125
АШ, ПА, Т, СС	W_I	ТЛУ	16-18		18-20		-		
		ЖЛУ	-	14-18		16-20	18-22	20-24	
	W_{II}/W_I	ТЛУ	1,3 - 1,4				-		
		ЖЛУ					1,4 - 1,5		
Каменные и бурные угли	W_I	ТЛУ	18-20	20-22	22-24	24-26	-		
		ЖЛУ	20-22		22-24	24-26	26-28	28-30	
	W_{II}/W_I	ТЛУ	1,3 - 1,4			1,3-1,4	1,5-1,6	-	
						1,4	1,6		
		ЖЛУ				1,4 - 1,6			

Таблица 2.3. Параметры крутки первичного и вторичного воздуха

Вид топлива	n_I		n_{II}	Способ шлакоудаления
	улитка	лопаточный аппарат		
АШ, ПА, Г, СС	3,5 - 4	2 - 2,5	4-3,5	ЖЛУ
Г, Д, ГСШ, бурные угли	3,5 - 4	2 - 2,5	3 - 3,5	
Типа экибастузского	1,5	1,5	3-3,5	ТЛУ
Т, СС, неокисленные шахтной добычи	-	1,5	3,5-4	ТЛУ
Бурные угли	1,5	1,5	2,5-3	ТЛУ

пропорционально росту паропроизводительности котла. Во-вторых, при сохранении тех же скоростей W_d и W_{Π}/W_T это привело бы к увеличению F_I , толщины кольца $0,5[D_I - (d_0 + \delta)]$ и растягиванию во времени горения основной массы топлива.

Интенсивность перемешивания реагентов, угол раскрытия факела, его дальность, размеры циркуляционных зон и количество находящихся в них газов определяются интенсивностью закрутки, характеризуемой так называемым конструктивным параметром крутки.

Конструктивный параметр крутки n представляет собой отношение продольной составляющей момента количества движения M к произведению продольной составляющей количества движения K на характерный геометрический параметр D . Согласно [4],

$$n = \frac{4M}{KD} = \frac{4U_a U_T \rho}{D U_0^2} \quad (2.2)$$

Момент количества движения M считается постоянным в продольном направлении. Величины U_a и U_T рассчитывают, исходя из условия равномерного распределения потока по сечению канала в месте, где они определяются; ρ - координата центра массы относительно оси вращения. За характерный размер D при расчете крутки по каналам первичного и вторичного воздуха принимается диаметр круга, эквивалентного по площади каналам F_I и F_{Π} :

Значения конструктивных параметров крутки различных завихрителей приведены в табл.2.2.

Суммарный параметр крутки горелки n_r , имеющей несколько кольцевых каналов ввода реагентов, определяются по формуле

$$n_r = \frac{\sum_{i=1}^P (n_i \rho_i U_{ai} F_i D_{рвi})}{D_{грв} \sum_{i=1}^P (\rho_i U_{ai}^2 F_i)} \quad (2.3)$$

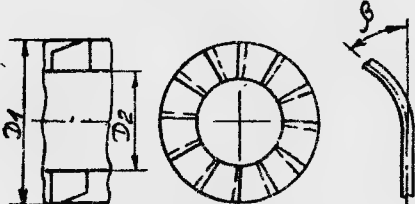
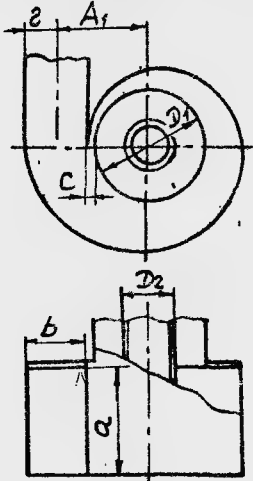
Величина эквивалентного диаметра амбразуры горелки

$$D_{грв} = \sqrt{D_a^2 - d_0^2}, \quad (2.4)$$

где n_i - конструктивный параметр крутки; U_{ai} - аксиальная скорость, м/с; ρ_i - плотность, кг/м³, в i - м канале площадь F_i ; $D_{рвi}$ - диаметр окружности, равновеликой по площади каналу F_i ; P - общее число каналов.

Для прямоточного ввода $n = 0$.

Таблица 2.2. Параметры крутки завихрителей

Тип завихрителя	Параметр крутки
а) аксиальный 	$\frac{\sqrt{2(D_1^2 + D_2^2)}}{\sqrt{D_1^2 - D_2^2}} \operatorname{tg} \beta$
б) тангенциальный 	$\frac{\pi \sqrt{D_1^2 - D_2^2}}{2 b n z_n} \frac{\sin \beta}{\sin \frac{180}{z_n} \cos(\beta + \frac{180}{z_n})}$ $z_n \geq 16$: $\sqrt{D_1^2 - D_2^2} \cdot \operatorname{tg} \beta / 2 b n$
в) улиточный 	$\frac{\pi A_1 \sqrt{D_1^2 - D_2^2}}{a b}$ $c = (0.03 - 0.05) D_1;$ $\frac{a}{b} = 1.67 - 2.5;$ $a b = (1 \div 1.25) \frac{\pi}{4} \times$ $\times (D_1^2 - D_2^2).$

Численные значения рекомендуемых значений параметров крутки потоков по первичному и вторичному воздуху даны в табл.2.3. Из представленных данных следует, что параметр крутки возрастает с уменьшением выхода летучих на горючую массу топлива. Влияние Π_r на процесс горения иллюстрируется рис.2.3.

При снижении нагрузки на котле до 70% в работе, как правило, находятся все горелки. Общее количество воздуха V_k пропорционально нагрузке. В условиях постоянства вентиляции мельниц $W_r = \text{const}$ ($V_r = \text{const}$), а W_{II}/W_r уменьшается, так как снижается количество вторичного воздуха ($V_{II} = V_k - V_r$). Следовательно, ухудшаются условия смещения и выгорания топлива (рис.2.4). Избежать этого можно, установив в канале вторичного воздуха закручиватель с поворотными лопатками или организовав ввод вторичного воздуха по двум автономным каналам. В последнем случае при снижении нагрузки можно отключить наружный канал, а подачу окислителя вести по внутреннему, непосредственно прилегающему к каналу пылевоздушной смеси. Для горелок с $Q_r \geq 50$ МВт два канала по вторичному воздуху являются обязательными.

Для горелок, работающих в сочетании со схемами прямого вдувания при $Q_r \geq 40$ МВт, рекомендуется иметь двойные подводы и по первичному воздуху (рис.2.5). При этом пылевоздушная смесь подводится к горелке от разных мельниц. Отключение одной из мельниц в этом случае будет значительно меньше влиять на топочный процесс.

При выполнении горелок с двойными каналами по первичному или вторичному воздуху параметры крутки во внутреннем и внешнем каналах принимаются разными. Для внутреннего канала

$$\Pi_{вн.г} = 0,75 \Pi_{внешн.г}$$

Для топлив с $V_r > 30\%$ допускается прямоточный ввод топливовоздушной смеси. Выходная часть амбразуры в этом случае может быть выполнена в виде диффузора с углом раскрытия $15-20^\circ$ и длиной $l_d = 0,3 D_d$, что в известной степени компенсирует отсутствие крутки первичного воздуха.

Выбор величины втулочного отношения $m = d_0/D_d$ оказывает, как и параметр крутки, заметное влияние на протяженность циркуляционной зоны и количество находящихся в ней газов. Для слабореакционных топлив $m = 0,2-0,25$. Для бурых и каменных углей $m = 0,3$ (для СС $m = 0,2$), для двойных горелок (рис.2.4) $m = 0,3-0,35$.

В последнее время при проектировании мощных горелок $Q_r \geq 45$ МВт для топков с ТШУ и $Q_r \geq 75$ МВт для ЖШУ намечалась тенденция

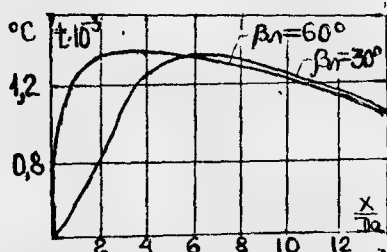


Рис.2.3. Влияние на горение параметра крутки

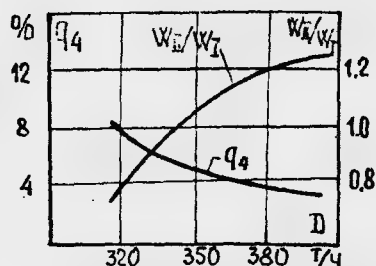


Рис.2.4. Зависимость потерь с q_4 от W_{II}/W_I

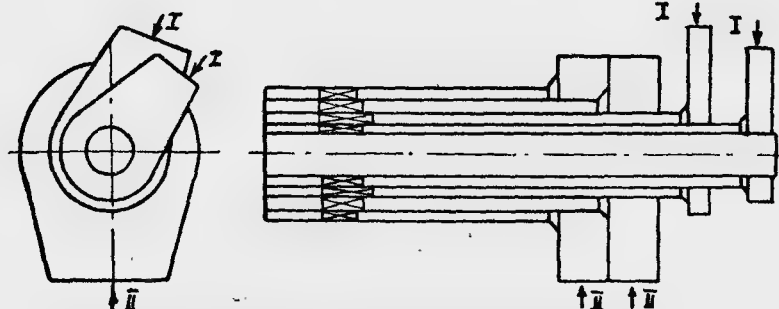


Рис.2.5. Двухпоточная по пыли и воздуху горелка типа ГЛД

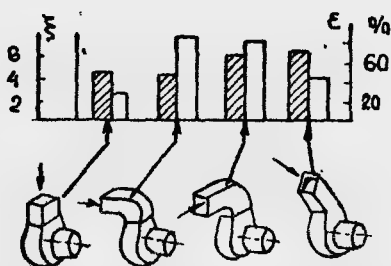


Рис.2.6. Зависимость коэффициента гидравлических потерь ξ и степени неравномерности полей скорости ϵ от конструкции подвода к завихрителю

к увеличению втулочного отношения $m = d_o / D_a$: Так, для АШ, ПА и Т $m = 0,35-0,5$, для каменных и бурых $m = 0,3-0,4$. Объясняется это тем, что при увеличенном втулочном отношении проще получить небольшую ширину канала первичного воздуха, чем при меньших значениях m .

Сравнительные характеристики различного типа закручивателей показывают, что наиболее простыми по конструкции являются лопаточные завихрители с плоскими лопатками и улиточные завихрители. Однако они имеют низкий КПД, а плосколопаточный завихритель - и высокий уровень гидравлических потерь. Лопаточный завихритель с профилированными лопатками имеет высокий КПД, низкий уровень гидравлических потерь, но сложен в изготовлении. Закручивающее устройство с тангенциальным подводом обладает высоким КПД, малыми гидравлическими потерями, но дает при тех же значениях Π меньшую длину циркуляционной зоны.

Существующими нормативными материалами [1,2] горелки типа ГУУ для вновь проектируемых котлов $D > 670$ т/ч не рекомендуются. Горелки типа ГУД целесообразно устанавливать на котлах, сжигающих слабореакционные топлива типа АШ, ПА и Т; ГУД - для каменных углей, ГСШ, СС, а ГПД - для каменных углей с $V^B \geq 30\%$ и бурых углей; ГПУ - на котлах паропроизводительностью до 120 т/ч.

Вихревые горелки изготавливают в большей части сварными из стали марки ст.3. Улитки могут быть литыми, чугунными. Толщина стенок каналов, $\delta = 10-16$ мм, литых улиток 20-30 мм. Из-за наличия у устья амбразур высоких температур горелки приходится заглублять внутрь на величину $\ell_a = 0,3 D_a$ и устанавливать выходные сменные насадки из жаропрочных сталей марок 03Х25Н25ЮТ и 20Х23Н18. Выгорание насадков в процессе эксплуатации ведет к нарушению аэродинамики и условий перемешивания первичного и вторичного воздуха. При установке лопаточных завихрителей в каналах первичного воздуха необходимо предусматривать возможность их периодической замены без проведения общего демонтажа горелки.

При организации подводов как первичного, так и вторичного воздуха необходимо избегать поворотов пыле- и воздухопроводов перед горелкой. Это обеспечивает не только снижение гидравлических потерь, но и меньшую неравномерность раздачи пыли и воздуха по сечению каналов горелки F_I и F_{II} (рис.2.6).

К положительным сторонам вихревых горелок следует отнести: универсальность по топливу, хорошую организацию смешения реагентов, наличие аэродинамических условий поддержания стабилизации процесса горения, большую единичную тепловую мощность. Недостатки: конструктивная сложность, сравнительно высокое гидравлическое сопротивление, несколько больший выход оксидов азота по сравнению с прямоточными горелками, недолговечность срока службы выходных насадков, большая склонность к сепарации топлива.

2.2. Прямоточные горелки

В горелках данной конструкции ввод первичного и вторичного воздуха в топку через амбразуру размерами $h \times b$ осуществляется по системе прямоточных каналов. Отсюда и название горелки - прямоточная. По организации ввода реагентов горелки подразделяют на горелки с односторонним подводом первичного воздуха (ГПО), с чередующимся вводом топлива и окислителя через систему горизонтальных (ГПЧг) и вертикальных (ГПЧв) каналов, плоскофакельные с центральным вводом первичного воздуха (ГПЦпф). Кроме того, к прямоточным горелкам относятся горелки глубокого предварительного перемешивания и ударного типа конструкции МЭИ. Конструктивные схемы горелок приведены на рис: 2.7, 2.9, 2.11.

Поток, образуемый истечением из амбразуры, относится к категории струйных течений со сложным начальным распределением параметров. В процессе развития струи в топочном пространстве происходит смешение реагентов (рис:2.8). Одновременно в струю из окружающей среды эжектируются продукты сгорания и происходит воспламенение пылевоздушной смеси. Циркуляционных зон здесь не образуется. Продольная составляющая скорости U_a значительно больше U_r и U_g .

Отсутствие циркуляционных зон делает условия воспламенения в значительной степени зависимым от общей аэродинамической организации процесса горения в топке, т.е. от взаимного расположения горелок.

Необходимая интенсивность перемешивания реагентов достигается здесь только за счет больших отличий в W_r и W_g/W_r по сравнению с вихревыми горелками (табл.4.12). Стремлением к интенсификации тепло- и массообмена с окружающей средой обусловлен и рост абсолютных значений W_r и W_g/W_r . Причины увеличения W_r и W_g/W_r с повышением тепловой мощности горелки те же, что и у вихревых горелок.

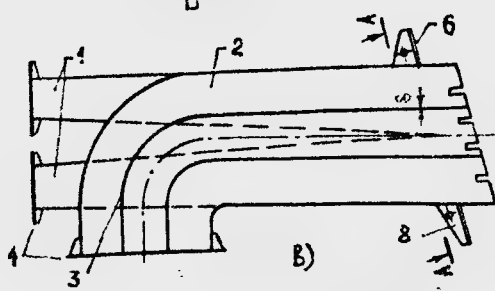
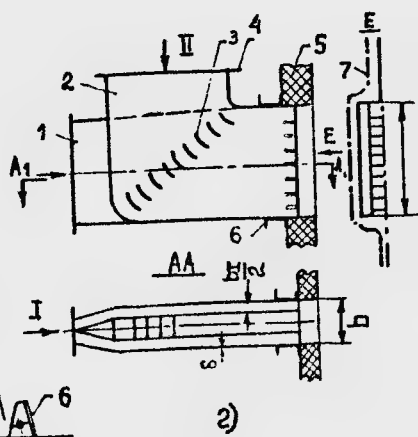
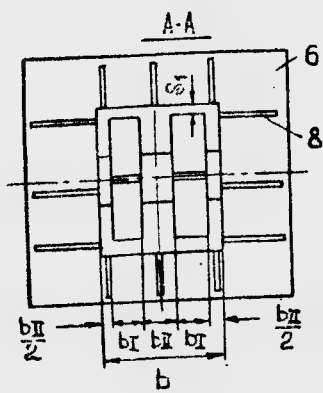
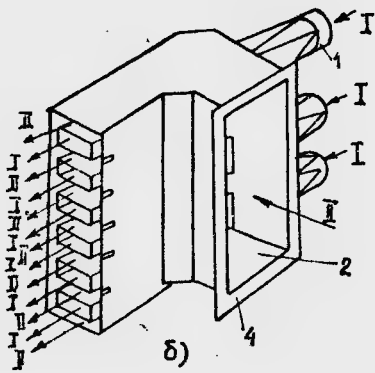
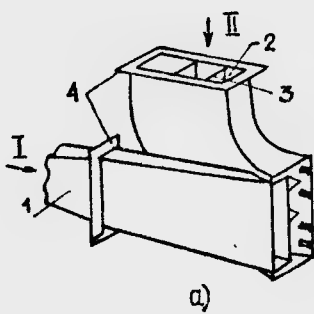


Рис.2.7

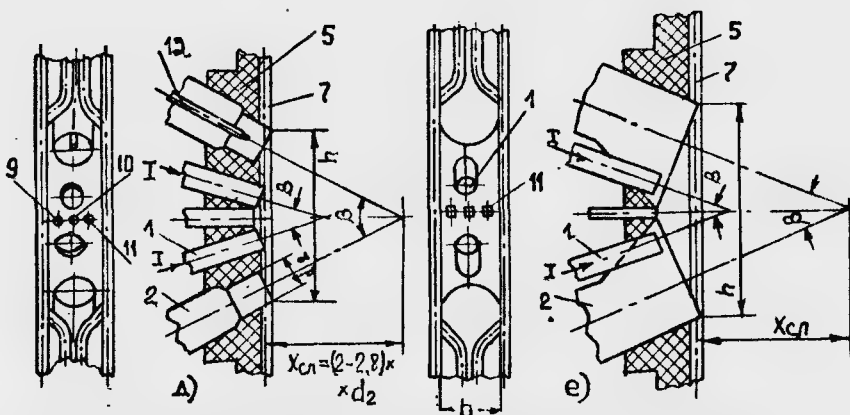


Рис.2.7: Конструктивные схемы прямоточных горелок типа ГЮ(а), ГПЧг(б), ГПЧв(в,г), ГПЧлф для слабореакционных (д) и реакционных (е) топлив;
1-2- каналы первичного (I) и вторичного воздуха; 3- направляющий аппарат; 4- соединительные фланцы; 5- обмуровка; 6- элемент крепления; 7- труба экрана; 8- ребра жесткости; 9- запальник; 10- форсунка; 11- гляделка



Рис.2.8: Схема процесса в прямоточной горелке типа ГПЧ (рис.2.7,г). Поля скоростей U_a и температур в поперечных сечениях факела

Таблица 2.4. Скорости W_I и W_{II} приточных горелок при номинальной нагрузке

Тип горелки	Жидкое шлакоудаление						Твердое шлакоудаление		
	АШ, ПА, Т, СС			Каменные и бурные угли			Каменные и бурные угли		
	Q_r , МВт	W_I , м/с	W_{II}/W_I ¹⁾	Q_r , МВт	W_I , м/с	W_{II}/W_I	Q_r , МВт	W_I , м/с	W_{II}/W_I
ГПЧГ	-	-	-	-	-	-	30-65	24-26	1,4-1,8
ГПЧВ	25-50	20-25	1,3-1,6	25-27	22-26	1,7-2,0	25-75	15-18 ²⁾	40-30 ³⁾
ГПО 4)	25-50	20-25	1,2-1,6	15-75	22-26	1,7-2,0	15-25	22-27	1,7-2,0 ^{м/с}
ГПЩПФ 4)	20-100	22-30	1,3-1,8	20-100	26-28	1,4-1,8	20-75	22-28	1,4-1,8

Примечания: 1. Меньшие значения W_{II}/W_I для топлив с меньшим выходом летучих и горелок с малой тепловой мощностью.

2. Для влажных топлив при сушке газами и размоле в мельнице вентиляторе.

3. Большие значения для топлив с $WP > 50\%$.

4. При сжигании углей марки Т с ТШУ применяются горелки.

ГПО ($Q_r = 15-50$ МВт; $W_I = 20-25$ м/с; $W_{II}/W_I = 1,2-1,6$) и ГПЩПФ

($Q_r = 20-75$ МВт; $W_I = 22-28$ м/с; $W_{II}/W_I = 1,3-1,6$).

Подавляющее большинство горелок имеет отношение $h/b > 1,5$, а у горелок типа ГПЧФ оно доходит до 5. В целях обеспечения более равномерного распределения пыли и воздуха по высоте горелки при $h > 1,5$ м делают два подвода по первичному и вторичному воздуху. Наличие двухстороннего подвода уменьшает габариты горелки, хотя и усложняет конструкцию. Равномерность подвода вторичного воздуха достигается и установкой направляющих аппаратов.

По технологическим соображениям минимальный размер отдельных каналов, например $b_{1/2}$ для горелки рис.2.7,г, не должен быть меньше 45 мм.

Материал горелок - сталь 3; $\delta = 10-16$ мм.

Практически все горелки на выходе по периферии снабжаются прорезями, позволяющими избежать коробления стенок из-за температурных напряжений. В ряде горелок (ГПО, ГПЧВ) этим целям служат зазоры δ_1 , исключающие температурные напряжения при стыковке стенок каналов с различной температурой и позволяющие охлаждать сопла первичного воздуха при отключении мельниц. С точки зрения протяженности зоны воспламенения и горения топлива целесообразно стремиться к большим значениям h/b . Однако на практике осуществить это оказывается зачастую невозможным. Причины: трудности с равномерной раздачей пыли и воздуха при $h \geq 2,5$ м; уменьшение аэродинамической жесткости струи в поперечном направлении к потоку, которое может привести к отклонению ее траектории после выхода в точку под действием, например, перепадов давления.

Область применения горелок типа ГПО - каменные и бурные угли, ПА, Т, СС; ГПЧВ и ГПЧГ - бурные и реже каменные угли с $V_f > 30\%$. Горелки типа ГПЧВ (рис.2.7г) с периферийной подачей пыли могут применяться и для сжигания слабореакционных топлив.

Плоскофакельные горелки ГПЧФ (рис.2.7,д) с центральным вводом (Ц) первичного воздуха применяются для сжигания АШ, ПА, Т, каменных углей и бурых. Конструкция горелки зависит от реакционной способности топлива. Угол встречи струй вторичного воздуха $\beta_2 = 50-60^\circ$. Расстояние между соплами вторичного воздуха и расстояния от них до точки пересечения осей струй находится в пределах $2,2-2,8 d_2$. * Меньшие значения, включая величину угла β_2 , характерны для слабореакционных топлив. Горелки двухпоточные по вторичному воздуху и одно-или двухпоточные по первичному.

Принцип работы основан на ударном взаимодействии потоков реагентов. Соударение приводит к торможению потока, росту периметра струи и интенсификации перемешивания.

К горелкам ГПЦ пф близки горелки МЭИ ударного типа (рис.2.9). Под углом $\alpha_{\Gamma} = 20-50^\circ$ к горизонту здесь ориентированы только каналы вторичного воздуха. При столкновении потоков происходит их торможение и деформация в сторону увеличения поперечных размеров (рис.2.10). Вторичный воздух как бы растягивает изнутри оболочку пылевоздушной смеси, заметно увеличивая периметр струи и ее массообмен с окружающей средой. Область применения таких горелок-каменные угли с $V_{\Gamma} \geq 28\%$ и бурные угли.

Горелки глубокого предварительного перемешивания (рис.2.11) применяют на котлах, укомплектованных системами пылеприготовления с прямым вдуванием с молотковыми мельницами и гравитационными сепараторами для сжигания фрезерного торфа, бурых, а в ряде случаев и каменных углей марок Г и Д.

Различают системы с одной и двумя горелками на мельницу. Одна горелка на мельницу устанавливается при перпендикулярном расположении оси ротора мельницы к фронту котла; две горелки - при параллельном положении осей роторов по отношению к фронту котла. Объясняется это тем, что в первом случае установка двух горелок на мельницу неизбежно привела бы к неравномерному распределению пылевоздушной смеси по горелкам из-за наличия циркуляционного вихря в сепараторе.

В обоих вариантах горелки имеют камеру предварительного смешения с конфузорным участком. Скорость по первичному воздуху в сечении 0-0 невелика и составляет 10-12 м/с, что обеспечивает в головке шахты давление не более 2 Па. Значения скоростей на выходе из амбразуры приведены в табл.2.5.

Температура аэросмеси на выходе из амбразуры и скорость по вторичному воздуху определяются на основании совместного решения уравнений постоянства теплосодержания и количества движения, записанных для сечений 0-0 и I-I в предположении о равномерном распределении по сечению скоростей W_{Γ} , W_{Γ} , $W_{ам}$.

Температура смешения в сечении I-I

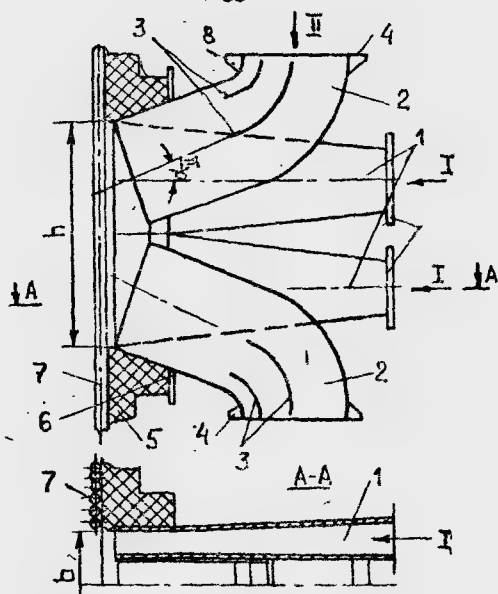


Рис.2.9. Горелка ударного действия МЭИ
(обозначения см. рис.2.7)

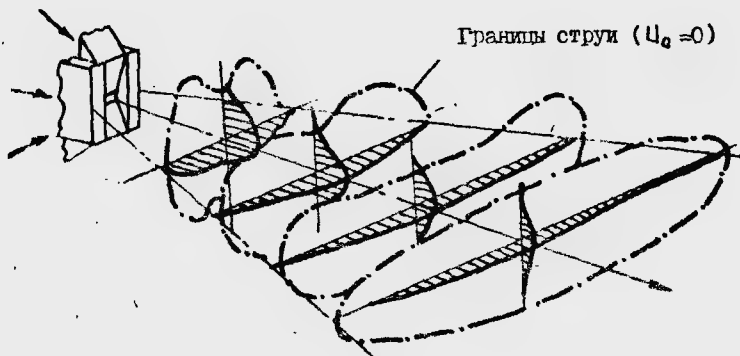


Рис.2.10. Картина течения струй, вытекающих из горелки ударного типа

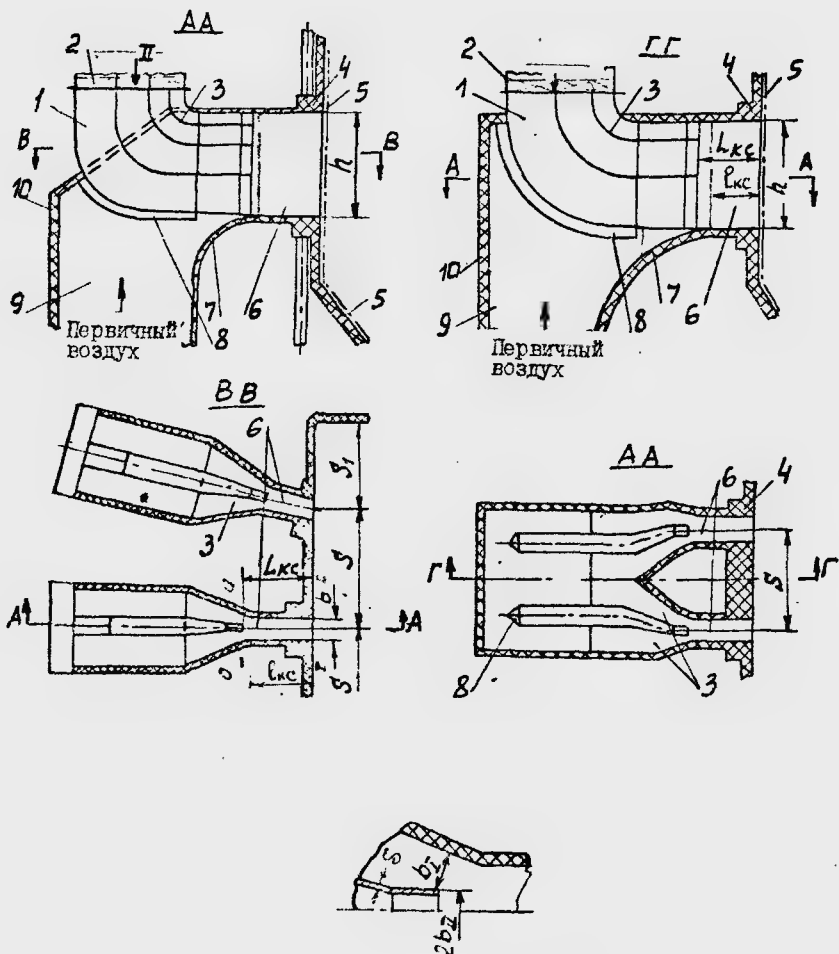


Рис.2.II. Горелки глубокого предварительного перемешивания МЗМ:
а-одноструйные горелки, б-двухструйные; 1-сопло вторичного воздуха, 2-шибера, 3-направляющие перегородки, 4-обмуровка, 5-труба экрана, 6-камера смешения, 7-нижний скат, 8-рассекатель, 9-шахта сепаратора, 10-теплоизоляция

Таблица 2.5. Скорость на выходе из амбразуры $W_{ам}$ горелок с предварительным перемешиванием

Топливо	Паропроизводительность котла D , т/ч			
	30 - 75	75 - 120	160 - 220	320
Фрезерный торф	16-20	20-25	25-30	30-35
Бурные и каменные угли	15-18	18-22	22-26	26-30

$$T_{см} = \frac{T_I [C_{тл}(1-\Delta W) + C_{еп} \Delta W + C_I(1+K_{прс})g_1] + C_{гв} \Gamma_{II} \gamma_{св} V^0 T_{II}}{C_{см} [1 + (1+K_{прс})g_1 + \Gamma_{II} \gamma_{св} V^0]}, \quad (2.5)$$

где T_I , T_{II} - температуры первичного и вторичного воздуха, К;
 $C_{тл}$, $C_{еп}$, C_I - теплоемкости топлива, водных паров и воздуха при температуре T_I , КДж/(кг·К); $\Gamma_{гв}$ - то же горячего воздуха при температуре T_{II} ; $\gamma_{св} = 1,293$ - удельный вес воздуха при 0°C , кг/м³; V^0 - теоретически необходимый для горения объем воздуха, м³/кг; Γ_{II} - доля вторичного воздуха, $K_{прс} = 0,05$ - коэффициент присоса воздуха в мельницу; g_1 - количество сушильного агента, кг/кг; $C_{см}$ - теплоемкость смеси; ΔW - величина влагосъема при сушке топлива. Все указанные величины принимаются или определяются на основании теплового расчета системы пылеприготовления и составления воздушного баланса котла.

Сечение амбразуры горелки, м²:

$$F = hb = (V_I + \Gamma_{II} V^0) \frac{B_m T_{см}}{273 \cdot \lambda W_{ам}}. \quad (2.6)$$

Здесь V_I - объем отработанного сушильного агента включая водяные пары и присос воздуха, м³/кг, а B_m - производительность мельницы по топливу, кг/с. Для одной горелки на мельницу $\lambda = 1$, для двух - $\lambda = 2$;

Скорость вторичного воздуха

$$U_{II} = \frac{U_{0m}(G_I + G_{II}) + P_{II} F_{0m} - G_I U_I}{G_{II}^2}, \quad (2.7)$$

где $G_I = [(1 + \kappa_{прс}) q_{г1} + 1] B_m$; $G_{II} = \gamma c \Gamma V^\circ B_m$

- расходы первичного и вторичного воздуха, кг/с; давление P_{II} ориентировочно может быть принято равным -160 Па. Обычно значения $U_{II} = 40-70$ м/с (большие значения для котлов большей мощности).

В целях регулировки распределения воздуха по высоте горелки в каналах вторичного воздуха устанавливаются шиберы. Для обеспечения равномерного распределения окислителя по высоте отдельных каналов оси шиберов устанавливают перпендикулярно фронту котла, а сам канал вторичного воздуха выполняют сужающимся. Предотвращение отложений пыли достигается скруглением нижнего ската и установкой сопла вторичного воздуха с таким расчетом, чтобы он сдувал пыль с горизонтального участка.

Длина камеры смещения $L_{кс}$ выбирается исходя из условия отсутствия во всем объеме камеры циркуляционных вихрей, могущих привести к самовозгоранию топливозвоздушной смеси внутри горелки:

$$\frac{L_{кс}}{b_I} \geq \frac{[(G_I + G_{II})/G_{II}]^2 (1 + \mu_{еп}) T_{II}}{0,141 T_I (1 + \mu)}, \quad (2.8)$$

где в добавление к (2.5) - (2.7) $\mu_{еп}$ и μ - концентрация водяных паров и топлива в сушильном агенте, кг/кг.

Угол конфузорного участка $\alpha_k \leq 25^\circ$, длина прямого участка $l_{кс} \geq 0,3-0,4$ м.

Соотношение сторон горелки $b/b \geq 3-4$.

Наличие развитого периметра и повышенных концентраций топлива на периферии обеспечивает устойчивое воспламенение и горение топливозвоздушной смеси на выходе из амбразуры.

Подводя итог краткому изложению материала по прямоточным горелкам, можно отметить их следующие положительные качества: конструктивную простоту по сравнению с вихревыми горелками, меньшее гидравлическое сопротивление и выход при прочих равных условиях оксидов азота.

К недостаткам следует отнести худшую организацию переме-

вания, более узкий за исключением ГПО и ГПЦф диапазон применения по топливам, меньшую единичную тепловую мощность, большую зависимость от аэродинамической организации процесса.

2.3. Соединение горелок с топкой

Узел соединения горелок с топкой может быть выполнен двумя конструктивными способами:

- жестким соединением с экранами при помощи переходных коробок;
- установкой между горелками и топкой специального уплотнения.

В первом варианте при тепловом удлинении экранов горелки перемещаются вместе с ними. Перемещение горелок компенсируется с помощью компенсаторов тепловых расширений, устанавливаемых на подводящих магистралях топлива и воздуха. Для пылеугольных котлов такое решение возможно в схемах пылеприготовления с промбункерами, когда пылепроводы имеют значительную протяженность. При этом необходимо принять специальные меры для предотвращения передачи консольной нагрузки от горелок на экраны.

Для котлов подвесной конструкции с близким к нему расположением мельниц (схемы с прямым вдуванием) пылепроводы получаются короткими. Жесткое соединение горелок с топкой здесь непригодно. Горелки устанавливаются в этом случае на неподвижном каркасе, а уплотнение допускает перемещение экранов топки относительно неподвижных горелок, обеспечивая при этом герметичность (отсутствие притока воздуха в топку) узла соединения.

На рис. 2.12, 2.14 представлены некоторые конструктивные варианты для котлов с жестким соединением горелок с экранами и установкой уплотнений:

Так, на рис. 2.14 экраны I топки снабжены коробкой 2, перемещающейся относительно уплотняющегося угольника 3, закрепленного на горелке 4. По периметру горелки устанавливаются пружинные устройства 5 для прижатия угольника 3 к раме коробки 2. В процессе растопки котла на газе или мазуте происходит удлинение экранов. Ось амбразуры совмещается с осью горелки, после чего можно переходить на подачу через горелки твердого топлива.

Отметим, что уплотнение колодочного типа (рис. 2.13) целесообразно применить в том случае, если в область направляющей обоймы 5 и колодки 6 будет исключено попадание пыли.

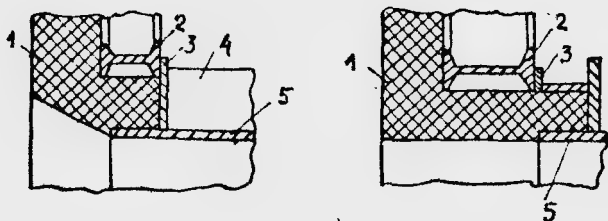


Рис.2.12. Схема жесткого соединения экрана с горелкой:
1-теплоизоляция, 2-переходная коробка, 3-фланец,
4-ребро жесткости, 5-корпус горелки

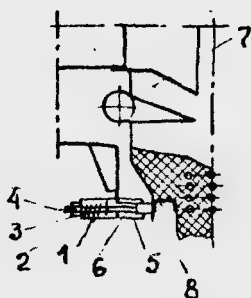


Рис.2.13. Колодочное уплотнение:
1-пружина, 2-скоба, 3-гайка, 4-штырь,
5-направляющая обойма, 6-колодка,
7-горелка, 8-плита уплотнения

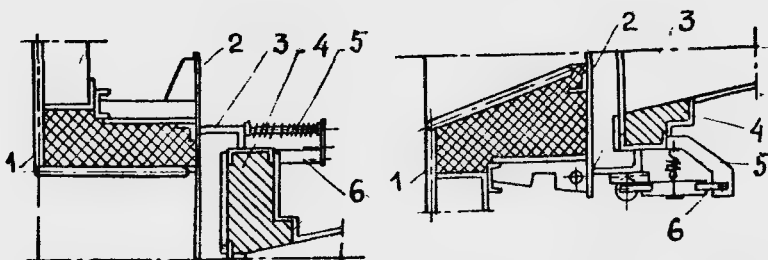


Рис.2.14. Монтажное положение узлов уплотнения горелок с топкой:

1-экран, 2-коробка, 3-уплотняющий угольник, 4-горелка, 5-пружинное устройство, 6-кронштейн

Контрольные вопросы к главе 2

1. Почему в вихревых горелках образуется циркуляционная зона?

2. За счет чего осуществляется стабилизация горения в вихревых и прямоточных горелках?

3. Чем объясняется различие а) в W_I и W_{II} ; б) в значениях W_I и W_{II}/W_I для вихревых и прямоточных горелок?

4. Какие горелки, на Ваш взгляд, подходят для сжигания экибастузского, кизеловского, кузнецкого углей, фрезерного торфа?

5. Рассчитайте параметры улиточного и лопаточного аппаратов для канала первичного воздуха, если известно, что $V_{I,гор} = 3,8 \text{ м}^3/\text{с}$, а $W_I = 25 \text{ МВт}$; $l_1 = 0,5 \text{ м}$.

6. Длина камеры смешения $l_{кс} = 1,4 \text{ м}$. Оцените выполнение условия отсутствия вихреобразования, если $T_{II}/T_I = 2$; $G_I/G_{II} = 1,1$; $h = 1,5 \text{ м}$; $V_{II,гор} = 7,85 \text{ м}^3/\text{с}$; $W_{II} = 70 \text{ МВт}$.

3. КОМПОНОВКА ГОРЕЛОК И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОК

3.1. Аэродинамика пылеугольных топок

Размещение горелок в топке носит название их компоновки. В зависимости от пространственной ориентации по отношению друг к другу горелки могут размещаться по одной из схем: фронтальной, встречной, тангенциальной или встречно-смещенной. Число ярусов горелок $Z_{\text{яг}}$ в общем случае равно 1-4. Каждой из схем компоновки присуща своя аэродинамическая картина течения продуктов сгорания в топочном объеме. Правильный выбор компоновки горелок с учетом свойств топлива, способа шлакоудаления во многом определяет экономичность и надежность работы котла, его маневренные характеристики и экологические показатели.

а) Фронтальная компоновка горелок

В данной схеме горелки размещают на одной, чаще фронтальной, стене топки котла в один или несколько ярусов (рис.3.1). Такая компоновка горелок обеспечивает малую протяженность пылепроводов, пониженные расходы на пневмотранспорт пыли. Пролеты между соседними котлами не загромождаются мельничным оборудованием и пылепроводами. Нет ограничений на расстояние между радиационной и конвективной шахтами. Особенно удачной такая схема является для индивидуальных систем пылеприготовления с прямым вдуванием и сушкой топлива горячим воздухом.

Как видно из рис.3.1, в топке наблюдаются две ярко выраженные циркуляционные зоны движения газов. Появление их обусловлено эжекционными свойствами струйных течений. Зоны занимают до 40-50% топочного объема. Верхний вихрь довольно "вялый", со скоростью опускных течений не превышающий 10% от скорости на выходе из горелок. В нижнем вихре скорость движения газов выше - до 20% от начальной. В численном отношении циркулирующие газы верхнего вихря составляют 50-60%, а нижнего - до 85% от начального расхода через горелки.

По количеству газов, подходящих к корню факела, основным для зажигания топливовоздушной смеси является нижний вихрь.

Из-за большого пути продукты сгорания в нем подхопит к устью амбразур достаточно охлажденными. Наличие присосов в нижней части топки может в этом отношении лишь усугубить положение.

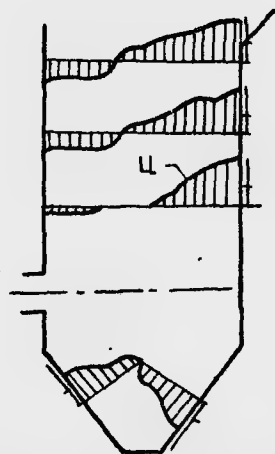


Рис.3.1. Аэродинамика топки с фронтальной компоновкой

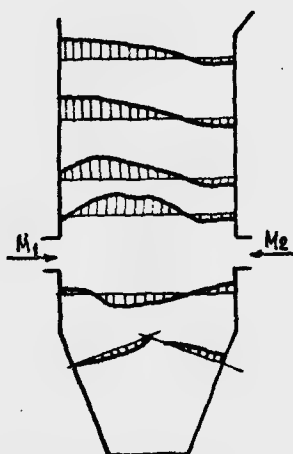


Рис.3.2. Картина течения в топке с встречной компоновкой прямоточных горелок ($M_2 > M_1$)

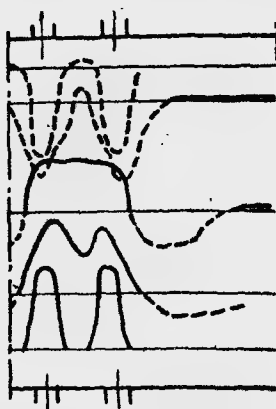


Рис.3.3. Картина течения в плоскости расположения горелок ($h/b = 3,5$, встречная компоновка)

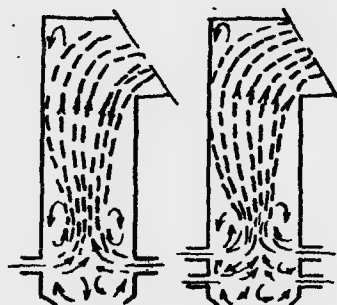


Рис.3.4. Аэродинамика топки со встречной компоновкой вихревых горелок в один (а) и два (б) яруса

Значительное количество газов, перемещающихся в топочном объеме, приводит к уменьшению действующих концентраций кислорода и ухудшает условия горения и особенно догорания топлива. Догорание происходит в узкой полосе восходящего потока, примыкающего к задней стене и занимающего до 1/3 глубины топки. Сравнительно высокие скорости в этой зоне сокращают время пребывания топлива в топочном объеме, что может привести к появлению потерь с механическим недожегом для топлив $V_{\Gamma} \leq 35\%$.

Повысить степень заполнения сечения топки восходящими потоками можно путем увеличения числа ярусов горелок или применения закрутки потока, т.е. установки вихревых горелок. Однако и в этом случае сохраняется один из основных недостатков фронтальной компоновки — динамическое воздействие факела на задний экран при смещении в его сторону от центра топки ядра горения. В эксплуатации это приводит к повышению вероятности шлакования труб и неравномерности тепловосприятия экранов по периметру топки.

Указанные обстоятельства послужили причиной сужения рамок применимости фронтальной компоновки как по паропроизводительности (ЖКУ $D \leq 220$ т/ч; ТКУ $D \leq 420$ т/ч), так и по топливу (газ, мазут, фрезерный торф, слабощлакующие угли с $V_{\Gamma} > 30\%$):

В сочетании с фронтальной компоновкой применяются вихревые, плоскофакельные горелки и горелки глубокого предварительного перемешивания.

б) Встречная компоновка горелок

Стремление к ликвидации динамического воздействия потока на экран привело к появлению встречной компоновки, при которой горелки располагаются одна против другой на противоположных стенах топки в один или несколько ярусов.

Аэродинамика топки при встречной компоновке во многом зависит от конструкции горелок.

При прямоточных горелках хорошее заполнение топочной камеры достигается лишь при строго одинаковом начальном количестве движения потоков, вытекающих из горелок.

Превышение суммарного импульса одного из струйных комплексов всего на 3-5% приводит к нарушению стабильности и симметричности картины течения с образованием восходящих и нисходящих потоков соответственно у стен топки, горелки которой обладают меньшим и большим импульсом pi^2 . Неустойчивость крайне трудно устранить в ус-

ловиях эксплуатации, так как это требует тонкого регулирования расходов вторичного и первичного воздуха по отдельным горелкам.

Устойчивость течения можно повысить, если столкновение потоков будет происходить с меньшей скоростью или по большей площади. Рассмотрим возможность практической реализации этих положений.

Уменьшение скорости достигается увеличением амбразуры горелок. Однако в этом случае процесс горения будет затягиваться, что может привести как к повышению температуры в конце топки, так и ухудшению условий стабилизации горения. Можно увеличить высоту и одновременно уменьшить ширину горелки. Но в этом случае снижается аэродинамическая жесткость струи в направлении, перпендикулярном большим граням горелки. Следствием этого является нарушение симметричности картины течения в горизонтальной плоскости (рис.3.3). Кроме того, может возникнуть довольно мощный поток газов, ориентированный на стену топки по аналогии с фронтальной компоновкой.

Как показала практика, не дают результата и искусственные приемы по уменьшению дальности путем создания большего периметра контакта пылевоздушной смеси с топочными газами за счет уменьшения единичной мощности горелок (увеличения числа горелок) или введения в амбразуру различного рода рассекателей.

Более перспективным решением представляется использование вихревых, плоскофакельных, ударных горелок.

В этих горелках вследствие пониженной дальности и большей площади рассеивания потока импульса ρu^2 аэродинамическая картина является более стабильной и обладает меньшей чувствительностью к начальной неравномерности расходов по отдельным горелкам.

На рис. 3.4 приведена картина течения в призматических топочных камерах при встречной одно- и двухъярусной компоновке вихревых горелок. Наблюдаются вихревые области над и под горелками, играющие наравне с внутренней циркуляционной зоной продуктов сгорания роль стабилизатора процесса горения. Как показали исследования Г.Х. Сун, заметное нарушение симметричности течения наблюдается лишь при 20% отличии в импульсах взаимодействующих потоков, что намного превосходит допускаемые значения $\Delta \rho u^2$ в горелках прямооточного типа.

Несмотря на большую устойчивость течения в вертикальной плоскости, известную опасность представляет наброс факела на боковые стены топки. Уменьшение влияния наброса достигается соответствующим

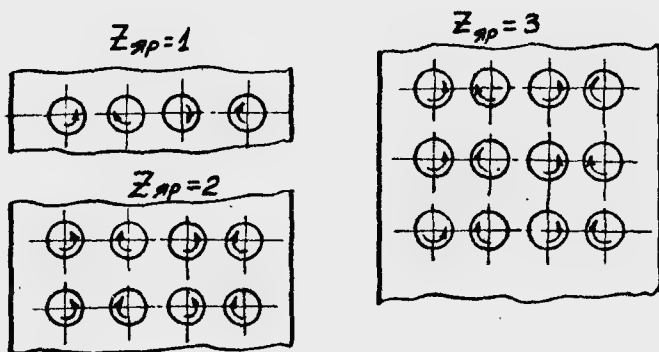


Рис.3.5 . Организация крутки потоков в топках с вихревыми горелками при различном числе ярусов

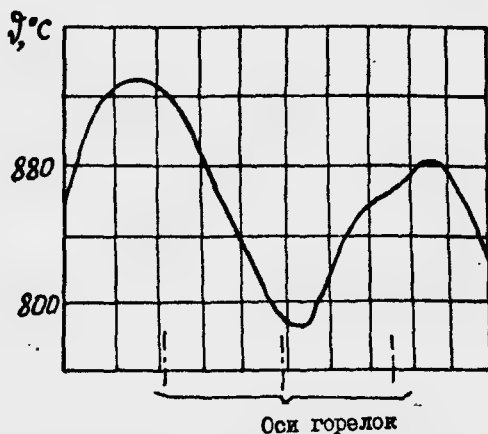


Рис.3.6 . Распределение температур газов по ширине топки котла ЦК-39 (по опытам Докшина П.А. и Лисового В.Г.)

щим выбором бокового простенка S_1 (см. § 3.2). Кроме того, для вихревых горелок оговаривается еще и направление крутки потока (рис.3.5).

Следует отметить, что для получения наиболее равномерного температурного поля по ширине на выходе из топки необходимо стремиться к тому, чтобы число горелок в ярусе было кратным четырем. В противном случае возможны пики и провалы с различием температур до 120°C (рис.3.6):

в) Тангенциальная компоновка горелок

Характерной особенностью тангенциальной компоновки горелок является ориентация осей последних по касательной к условной окружности диаметром d_y , находящейся в центре топki (полутопки).

Прямоточные горелки располагаются в один или несколько ярусов по углам топki (полутопки) или по всему ее периметру. В последнем случае число горелок в ярусе может быть равно 6 или 8 (рис.3.7).

Характерная картина течения в тангенциальной топке представлена на рис. 3.8 в виде полей аксиальной и тангенциальной составляющей скорости. За счет центробежного момента возникает вращение потока. При этом струи, вытекающие из горелок, при столкновении оказывают друг на друга динамические воздействия. В результате траектории их движения искривляются и максимальные значения тангенциальной скорости U_τ располагаются на окружности, диаметр которой больше d_y . Крутка потока сохраняется практически на большей части высоты топki, хотя интенсивность ее заметно меняется. Над горелками формируется зона с обратными токами, где аксиальная составляющая скорости $U_a < 0$. Подъемные (восходящие) токи над горелками располагаются по периметру топki. Область максимальных скоростей U_τ практически совпадает с областью максимальных значений U_a , смещаясь при подъеме факела к стенам топki. Наличие в центре топki опускного (над горелками) и подъемного (под горелками) течений свидетельствует о возникновении пониженного давления в центральной части топki.

Увеличение числа ярусов горелок приводит к лучшему наполнению топki (рис.3.9). Это объясняется тем, что при увеличении числа ярусов горелок закрученный поток из каждого последующего яруса, считая от нижнего, движется вокруг предыдущего, увеличивая радиус вихря.

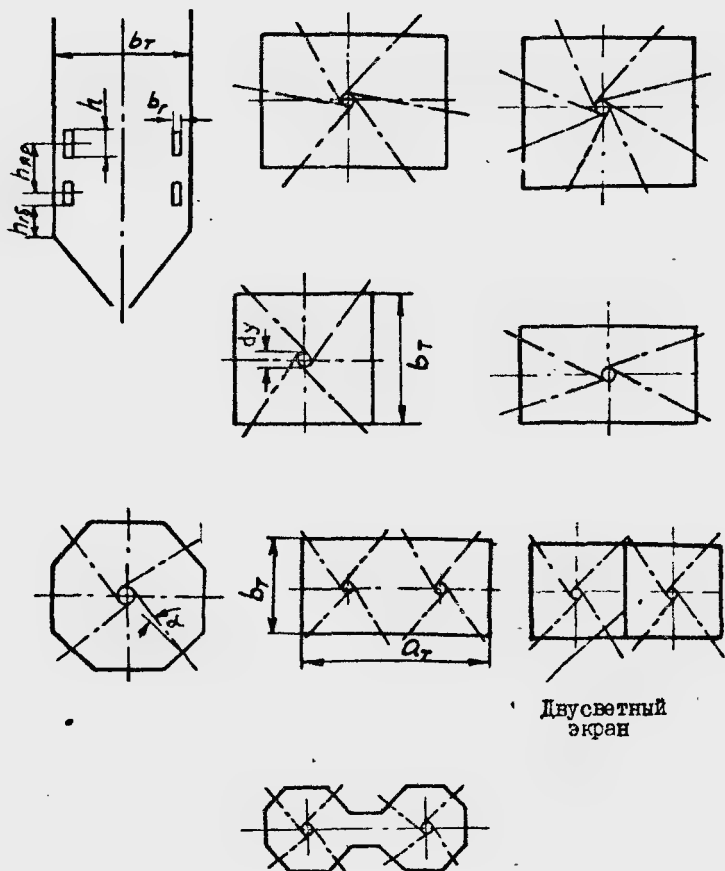


Рис.3.7. Схемы расположения горелок при тангенциальной компоновке.

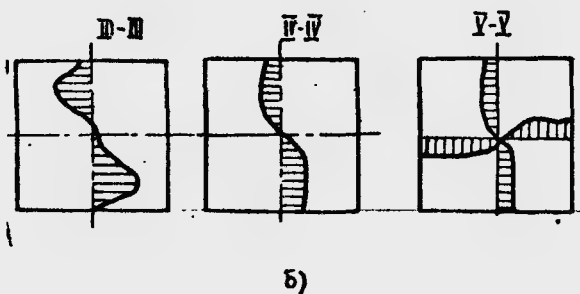
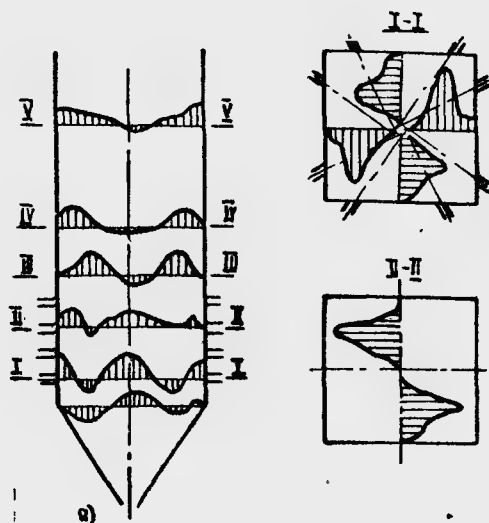
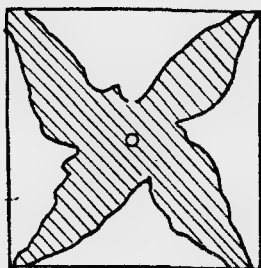
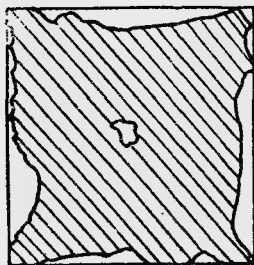


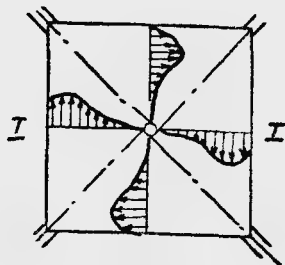
Рис.3.8. Аэродинамика точки с тангенциальным расположением горелок: а - поля аксиальной скорости U_a ; б - поля тангенциальной составляющей скорости U_τ



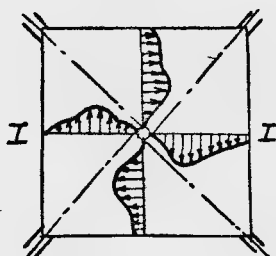
Один ярус горелок



Три яруса горелок



Один ярус



Два яруса

Рис.3.9. Аэродинамика точки при различном числе ярусов горелок

Наиболее оптимальные условия создаются при топках (полутопках), имеющих в плане форму, близкую к квадрату $Q_T/b_T < 1,1-1,2$, и незначительное отличие в углах установки горелок $\Delta\alpha$. Оптимальным считается вариант, когда $\Delta\alpha \leq 6^\circ$.

При сильно вытянутой в плане топке аэродинамическая картина нарушается. И хотя крутка потока имеет место, наблюдается прямое динамическое воздействие факела на стены, сопровождающееся при ТШУ их шлакованием.

Так, в [5] описан случай шлакования стен фронтального и заднего экранов топки при сжигании подмосковного бурого угля в котле ТП-240-1, имеющем топку с отношением сторон $Q_T/b_T = 1,47$. Изменение направления крутки потока приводило лишь к изменению места шлакования экранов (рис. 3.10). Отмеченный факт объясняется отклонением струи под действием перепада давления ($\Delta P = P_1 - P_2$), возникающего как из-за различных условий удовлетворения эжекционных потребностей струй, так и наличия динамического взаимодействия струй в момент столкновения. Очевидно, что эффект смещения факела к фронтальной и задней стенам будет тем больше, чем больше отношение Q_T/b_T и значение $\bar{d}_y = d/b_T$.

Относительная высота горелок также оказывает влияние на аэродинамику. При больших значениях h/b или $\sum h/b$ поток "прилипает" к стенке независимо от величины $\bar{d}_y$. При $h/b = 8$ и $Q_T = b_T$ смещение местоположения максимума U_T на окружность с радиусом, близким к $b_T/2$, наблюдалось в диапазоне $\bar{d}_y = 0,08-0,32$. Подобное явление объясняется потерей устойчивости течения из-за снижения аэродинамической жесткости струи под действием начального перепада давления ΔP , образующегося вследствие отклонения траекторий струй.

Уменьшение относительной высоты горелки h/b с 4 до 2 при одновременном переходе с одного яруса на два меняет картину течения: местоположение зоны максимума U_T смещается к центру топки. По данным [1], для многоярусной тангенциальной компоновки горелок необходимо иметь $h/b \leq 2,5$ при расстоянии между горелками отдельных ярусов $h_{яp} - h \geq 2,5b$. Для одноярусной или двухярусной блочной компоновки горелок отношение h/b (или $\sum h/b$) должно быть меньше 4.

В первом случае зазоры между ярусами способствуют выравниванию давления и уменьшению ΔP . Во втором случае аэродинамичес-

кая жесткость струи оказывается достаточной для противодействия градиенту давления.

Значение условного диаметра крутки для топок с ТБУ рекомендуется принимать в интервале $\bar{d}_y = 0,08-0,12$ [1], а для ЖБУ $\bar{d}_y = 0,14-0,18$.

По данным [1], лучшие результаты в топках с тангенциальной компоновкой горелок при ТБУ отмечены на котлах, у которых $b/b_T = 0,07-0,08$ (при паропроизводительности $D \leq 1000$ т/ч) и $b/b_T = 0,05-0,06$ ($D \geq 1650$ т/ч).

Расстояние от образующей нижнего яруса горелок до началагиба труб холодной воронки $h_{гв}$ принимается равным $(2-2,8)b$ [1,2] по соображениям лучшего заполнения факелом холодной воронки (ТБУ) и приближения ядра горения к поду топки (ЖБУ).

Анализ различных аэродинамических схем показывает, что хорошие результаты можно получить в схемах с расположением горелок по периметру топки. Причина - меньшая чувствительность аэродинамики к отключению не только отдельной горелки, но и блока горелок по высоте. В других схемах стабилизация аэродинамической картины течения достигается труднее. Так, в схемах с прямым вдуванием при $Z_{яp} \geq 2$ и числе горелок в вихре, равном 4, количество мельниц должно быть кратным числу горелок и числу ярусов. Подвод топлива на ярус в этом случае целесообразно осуществлять от одной мельницы. Такой же схемы следует придерживаться и в системах пылеприготовления с промбункером при подаче пыли в топку отработанным сушильным агентом.

При числе горелок в вихре, равном 6 или 8, и многоярусной компоновке горелок можно осуществлять подвод топлива к горелкам различных ярусов по вертикали от одной мельницы, что является более простым решением.

Тангенциальная компоновка применяется в сочетании с прямоточными горелками типа ГПЮ и ГПЧв. Для котлов $D \leq 320$ т/ч допускается использование горелок ГПЦпф.

г) Встречносмещенная компоновка горелок

Мероприятия по уменьшению дальнобойности факелов прямоточных горелок при снижении до минимума динамического воздействия потока на экраны нашли отражение в разработанных МЭИ топках со встречносмещенными струями (ВСС):

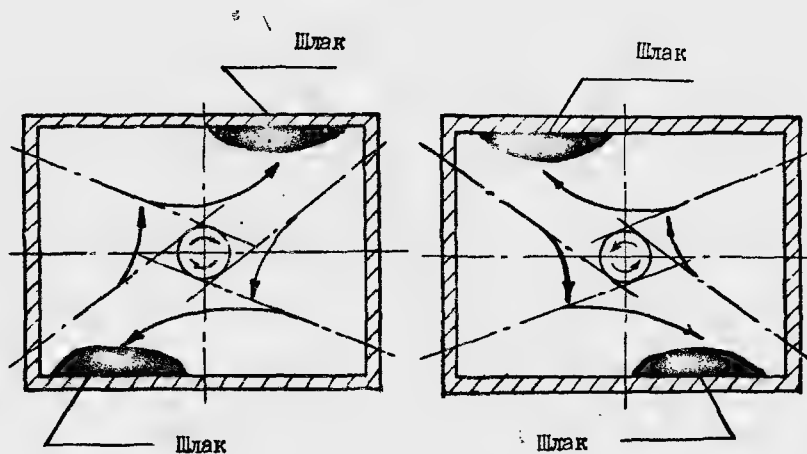


Рис.3.10. Места шлакования стен топки котла ТП-240-І при изменении направления закрутки потоков

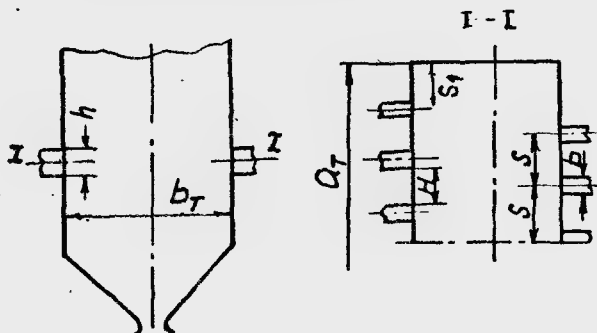


Рис.3.11. Схема расположения горелок по встречносмещенной компоновке

Горелки устанавливаются на противоположных стенах топки со смещением относительно друг друга на величину полушага между горелками (рис.3.11). Число ярусов горелок 1-2.

В зависимости от шага между горелками в принципе возможно наличие в топке трех режимов: фронтального, переходного и проникающего. Аэродинамические особенности режимов иллюстрируются рис.3.12.

Картина течения в топке с ВСС определяется величиной параметра $W = \frac{S-b}{b} \sqrt{b/h}$. При $W \leq 0,05$ наблюдается фронтальный, при $0,05 < W \leq 0,078$ - переходный, а при $W > 0,078$ - проникающий режимы.

Изменение области существования режимов течения в зависимости от геометрических типоразмеров компоновки для $h/b \geq 1,5$ приведено на рис.3.13. Анализ картины течения показывает, что переходный режим является наиболее приемлемым для топок с ТЗУ. Во-первых, в этом случае активно используется объем холодной воронки, а во-вторых, исключаются набросы факела на стены. Для шлакующих топлив рекомендуется принимать $W = 0,085-0,96$, для нешлакующих - $0,06-0,86$. Значение $W = 0,06-0,085$ следует принимать и при сжигании низкосортных топлив; это позволит повысить теплонпряжение активной зоны горения.

Расположение горелок по встречносмещенной схеме позволяет:

- уменьшить дальность прямого факела, вплоть до полного исключения удара факела в стенку топки;
- повысить нечувствительность системы к неравномерности распределения реагентов по горелкам;
- интенсифицировать массообмен между струями;
- обеспечить стабилизацию процесса горения за счет устойчивого подвода продуктов сгорания к корню факела;
- получить хорошее заполнение топочной камеры восходящими потоками.

Указанная компоновка применяется в сочетании с прямоточными целевыми горелками, имеющими периферийный подвод топлива и центральный подвод вторичного воздуха. При этом конструкция горелки должна отвечать условию $h/b \geq 1,5-2$. Периферийный подвод топлива дает возможность иметь повышенную концентрацию пыли в наружных слоях факела, непосредственно контактирующих с топочными газами. В то же время центральный подвод вторичного воздуха гаран-

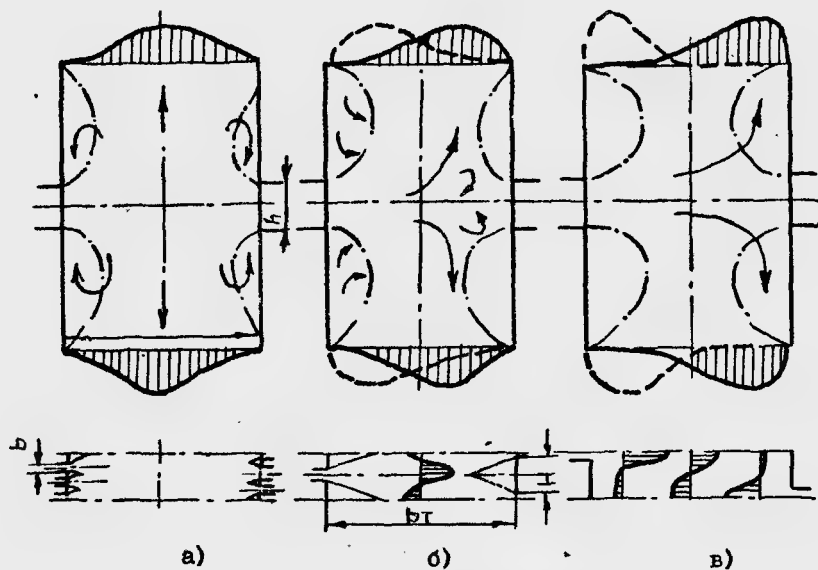


Рис.3.12. Схема течения ВСС при фронтальном (а), переходном (б) и проникающем (в) режимах течения



Рис.3.13. Области существования режимов ВСС

тирует поддержание повышенной действующей концентрации кислорода в активной зоне горения, что способствует лучшему выжигу топлива.

Специфическим для аэродинамики топок с ВСС является краевой эффект, связанный с отклонением струй крайних горелок в сторону стен, свободных от их размещения. Наличие динамического воздействия факела на экран может привести к его шлакованию. Для борьбы с этим явлением существует ряд мер: увеличение простенка S_1 , установка крайних горелок половинной тепловой мощности, подача сброса (если он имеется) либо через крайние горелки, либо через сопла на боковых стенах топки.

Наиболее хорошие результаты от применения системы ВСС достигаются в сочетании со схемами шленприготовления с промбункером пыли при сжигании бурых и каменных углей, в том числе обладающих заметной склонностью к шлакованию. Вследствие интенсивного перемешивания продуктов сгорания химический недожог не наблюдается вплоть до значений $\alpha_T = 1,1-1,13$. Выход оксидов азота на 20% ниже.

3.2. Тепловые характеристики топок

К тепловым характеристикам топок относят показатели, дающие представление о степени допускаемой форсировки процесса горения.

Плотность тепловыделения на 1 кв.м сечения топочной камеры характеризует тепловое напряжение поперечного сечения, МВт/м²,

$$q_F = \frac{B_F Q_H^P}{F_T} = \frac{B_F Q_H^P}{a_T b_T} \quad (3.1)$$

Вместе с величиной теплового напряжения яруса горелок, МВт,

$$q_{гя} = \frac{B_F Q_H^P}{Z_{яг}} \quad (3.2)$$

величина q_F косвенно определяет уровень температур газов в зоне горения и температуры металла труб экранов. Величины q_F и $q_{гя}$ лимитируются (табл.3.1). Чем больше склонность топлива к шлакованию, тем меньше допускаемые значения q_F и $q_{гя}$. Для компоновки горелок, обеспечивающей меньшее динамическое воздействие потоков газов на экраны, допускаются более высокие значения q_F и $q_{гя}$. В топках с ЖБУ эти показатели заметно выше; объясняется это меньшей топлотой, воспринимаемой экранами (наличие огнеупорной обмазки), и

Таблица 3.1. Допускаемые значения теплового напряжения сечения топок и яруса горелок при сжигании пылевидных топлив [I-3]

Число ярусов горелок	Способ шлакоудаления	Топливо	q_F , МВт
I	ТШУ	Шлакующие каменные и бурые угли	2,3 (2,0)
		Нешлакующие угли типа экибастузские	3,5 (3,0)
I-2	ЖШУ	АШ, ПА,Т, ЗСС	5,2 (4,5)
		Каменные угли Г,Д, ГСШ, ИСС, бурые угли	6,4 (5,5)
2 - 4	ТШУ	Нешлакующие типа экибастузского	6,4 (5,5)
		Шлакующие каменные и бурые угли	3,5(3), $D < 1000$ т/ч
			4(3,5), $D \leq 1650$ т/ч 4-4,6, $D > 1650$ т/ч (3,5-4)

Примечание. В скобках указаны значения теплонпряжений в $\text{Гкал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

отсутствием ограничения по шлакованию в зоне горения.

Помимо Q_F и $Q_{гг}$ к параметрам, определяющим условия работы экранов, относят удельный тепловой поток в зоне активного горения, МВт/м^2 (рис.3.14):

$$q_{\text{аг}} = \frac{B_p Q_H^p b_r}{2(q_T + b_T) h_{\text{аг}} + (1 + \psi' / \psi_{\text{ср}}) q_T b_T - z_r f_r} \quad (3.3)$$

Здесь B_p - расход топлива, кг/с ; Q_H^p - теплота сгорания топлива, МДж/кг ; b_r - доля тепловыделения в зоне (для практических расчетов $b_r = 1,0$); q_T и b_T - ширина и глубина топки, м ; $z_r f_r$ - площадь амбразур горелок, м^2 ; ψ' - коэффициент, учитывающий передачу теплоты из зоны активного горения; $\psi_{\text{ср}}$ - средний коэффициент тепловой эффективности экранов [3]. Для высокотемпературного сжигания $\psi' = 0,2$, для низкотемпературного - $\psi' = 0,1$. Высота зоны активного горения, м :

$$h_{\text{аг}} = h_{\text{яр}} \cdot z_{\text{яр}} \quad (3.4)$$

При числе ярусов $z_{\text{яр}} = 1$ для вихревых горелок $h_{\text{аг}} = 3 \Delta a$, а для прямоточных $h_{\text{аг}} = 2h$.

Допускаемые значения $[q_{\text{аг}}]$ для топок с ТЛУ приведены в табл.3.2. В случае жидкого шлакоудаления ориентировочно можно принять $[q_{\text{аг}}] = 0,88 - 1,16 \text{ МВт/м}^2$ для однокамерных и $[q_{\text{аг}}] = 1,16 \text{ МВт/м}^2$ - для циклонных топок.

К тепловым характеристикам топок относится и величина теплового напряжения объема, МВт/м^3 ,

$$q_V = \frac{B_p Q_H^p}{V_T} \quad (3.5)$$

косвенно определяющая среднее время пребывания газов в объеме V_T , м^3 , топочной камеры. По условиям получения требуемой полноты выгорания топлива значения q_V лимитируются (табл.3.3,3.4). Допускаемое значение q_V тем больше, чем выше реакционная способность топлива и уровень температур факела в зоне горения. Помимо общего теплонапряжения объема топки q_V в случае жидкого шлакоудаления ограничиваются значения теплового напряжения объема зоны активного горения или камеры горения, МВт/м^3 :

Таблица 3.2. Тепловое напряжение лучистой поверхности
 $[q_{\text{ЛГ}}]$ в зоне активного горения, МВт [1]

Топливо	Расположение горелок		
	однофронтальное	вотречное	тангенциальное
Бурные шлакующие угли (березовские, Канско-ачинские, подмосковные)	0,7	0,8-0,87	0,8-0,87
Каменные угли типа ГСШ ¹⁾	0,8-0,9	0,9-1,0	0,9-1,0
То же СС	1,16	1,16	1,15
То же типа экибастузского	1,16	1,23	1,23

1) Меньшая цифра для шлакующих углей

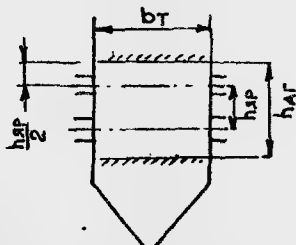


Рис.3.14. Схема границ зоны активного горения

Таблица 3.3. Расчетные характеристики топок с ЖМУ [2]

Тип топки	Топливо	Избыток воздуха в топке α_T	Тепловое напряже- ние		Недожог, %		Доля уно- симой золы $O_{ун}$
			объема топки $Q_{IV}, \text{МВт}$	камеры горе- ния $Q_{VK}, \text{МВт}$	Q_3	Q_4	
1	2	3	4	5	6	7	8
Открытые	АШ, ПА	1,2-1,25	0,145	0,58-0,7	0	3-4	0,85
	Т, ЗСС	1,2-1,25	0,185	0,58-0,7	0	1,5	0,8
	Каменные угли	1,2	0,185	0,75-0,87	0	0,5	0,8
	Бурные угли	1,2	0,210	0,75-0,87	0	0,5	0,5-0,8
Полуоткрытые с пережимом	АШ, ПА	1,2-1,25	0,170	0,58-0,7	0	3-4	0,85
	Т, ЗСС	1,2-1,25	0,200	0,58-0,7	0	1,0	0,8
	Бурные угли	1,2	0,230	0,70-0,93	0	0,5	0,6-0,8
	Каменные угли	1,2	0,200	0,75-0,87	0	0,5	0,6-0,7
С горизонтальными циклонами	Каменные и бу- рые угли, дроб- ленка	1,2-1,2	0,35	1,3	0,5	$\frac{2-5^1}{5-10}$	0,1-0,15
С вертикальными циклонами	АШ ($Q_{н}^p > 5,1$ МДж/кг, $A^p < 5$); Каменные и бу- рые угли	1,1-1,2	0,30-0,35	0,53-0,87	0	-	0,2-0,4 ²⁾

Продолжение табл. 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8
Двухкамерные топки	Каменные угли	I, I5-I,2	0,2	0,7-0,8	-	0,5	0,3-0,6
Двухкамерная топка с пере- секающимися струями МЭИ ³⁾	АШ, ПА, шлам	I,2	0,17	0,45-0,6	0	3-4	0,75-0,8

Примечания:

1. В числителе и знаменателе первая цифра отвечает грубой пыли бурых и каменных углей, вторая - дробленке тех же топлив.
2. Большие значения для АШ.
3. Применяется с односторонней компоновкой прямоточных горелок с периферийной подачей пылевоздушной смеси.

Таблица 3.4. Расчетные характеристики топок с ТМУ [1]

Топливо	Коэффициент избытка воздуха α_T	Допустимая величина, Q_v $\frac{\text{МВт}}{\text{м}^3}$	Потеря теплоты от недожога, %		Доля зольности, уносимой газами, $Q_{ун}$
			химического Q_3	механического Q_4	
ЛШ, ПА, Т, ЗСС	1,2 - 1,25 ¹⁾	0,14	0	6-4 ²⁾	0,95
Т, ЗСС	1,2 - 1,25 ¹⁾	0,16	0	2	0,95
Каменные угли	1,2	0,175	0	1,0-1,5 ³⁾	0,95
Отходы углеобогащения	1,2	0,160	0	2-3 ³⁾	0,95
Бурные угли	1,2	0,19	0	0,5-1 ³⁾	0,95
Фрезерный торф	1,2	0,16	0	0,5-1 ³⁾	0,95
Сланцы	1,2	0,115	0	0,5-1	0,96

Примечания: уменьшение производительности до 70% не снижает экономичности горения, при 50% нагрузке

Q_4 возрастает в 1,5 раза для всех топлив, кроме торфа и сланцев;

1) большая величина при транспортировке пыли горячим воздухом;

2) меньшие значения для ПА;

3) меньшая цифра при приведенной зольности $A^п < 1,43$.

$$q_{v,кг} = \frac{B_p Q_p^n}{V_{кг}} \leq [q_{v,кг}] . \quad (3.6)$$

3.3. Оценка надежности работы топок с ТЛУ по температуре на выходе из зоны горения

Для топок с ТЛУ лимитирующими являются температуры ϑ_{Ag}'' на выходе из активной зоны горения при максимальной (100%) и минимальной (50%) нагрузках котла.

Значение $\vartheta_{Ag,max}''$ ограничивается по условиям отсутствия шлакования, а $\vartheta_{Ag,min}''$ определяется устойчивостью процесса горения.

В общем случае

$$\vartheta_{Ag}'' = \frac{(100 - q_{4г}) Q_p^n / ((100 - q_{4г}) + Q_{вг} + i_{тл} + r_{гп} - Q_6)}{(V_{сг})_г + r(V_{сг})_{г.гц}} - \frac{5.67 \cdot 10^{-8} \varepsilon_T (T_{Ag}'')^4 \psi F}{B_p [(V_{сг})_г + r(V_{сг})_{г.гц}]} . \quad (3.7)$$

Механический недожог $q_{4г}$ %, в конце зоны активного горения принимается по табл.3.5, а $q_{4г}$ - по табл.3.4. Значения теплоты, вносимой в топку с воздухом $Q_{вг}$, топливом $i_{тл}$, газами рециркуляции $r_{гп}$, коэффициента тепловой эффективности топки ε_T , определяются на основании теплового расчета котла, а потери с $Q_6 = q_6 Q_p^n$. Средние теплоемкости продуктов сгорания $(V_{сг})_г, (V_{сг})_{г.гц}$ газов рециркуляции определяются при $\vartheta = \vartheta_{Ag}''$ и избытке воздуха $\alpha = \alpha_{Ag}''$. Величина

$$\psi F = \psi_{ср} [F_{ст. Ag} + (\psi' / \psi_{ср} + 1) a_T b_T] , \quad (3.8)$$

где $F_{ст. Ag}$ - поверхность стен топки, ограничивающая зону активного горения, m^2 ; $\psi', \psi_{ср}$ - см. (3.3).

Допускаемые значения $\vartheta_{Ag,max}''$ и $\vartheta_{Ag,min}''$ даны в табл.3.6.

Для выполнения условия $\vartheta_{Ag,min}'' \leq \vartheta_{Ag}(D) \leq \vartheta_{Ag,max}''$

Таблица 3.5. Величина механического недожога в конце зоны активного горения [1]

Топливо	Коэффициент полидисперсности, η	$q_{4г}, \%$
Тощий уголь, $R_{90} = 10\%$	0,9	10
Каменные угли		
$V^Г = 24\%; R_{90} = 12-15;$	1,0	7
$V^Г = 40\%; R_{90} = 25-30;$	1,0	8
Бурные угли		
$R_{90} = 55; R_{1000} < 1,5$	1,0	5

Таблица 3.6. Температура в конце активного горения $\vartheta_{4г}, ^\circ\text{C}$ [1]

Топливо	$\vartheta_{4г}, ^\circ\text{C}$	
	$D_{ном}$	$0,5 D_{ном}$
Бурные угли (канско-ачинские, подмосковные) ¹⁾	1250-1300	1150
Каменные угли типа Г, Д, ГСШ ²⁾	1400-1500	1300-1400
Экибастузский уголь	1550	1400-1450

Примечания:

1) меньшая цифра для березовских углей;

2) меньшая цифра для шлакующих углей.

при работе котла можно варьировать как $\dot{m}_{\text{газ}}$, $q_{\text{газ}}$, так и коэффициент рециркуляции газов Γ .

При снижении нагрузки для увеличения $\dot{m}_{\text{газ}}$ количества газов рециркуляции может, например, уменьшаться. Следует помнить, что ввод газов рециркуляции понижает температуру задела, снижая тем самым надежность стабилизации зажигания. Применять рециркуляцию целесообразно для высокореакционных топлив с $V_{\text{г}} > 40\%$ при $q_{\text{г}} > 13 \text{ МДж/кг}$.

3.4. Компонировка горелок в топке

В табл. 3.7 и 3.8 приведены нормативные рекомендации по выбору компоновки и типа горелок в зависимости от способа шлакоудаления и тепловой мощности топок.

Табл. 3.9 содержит рекомендации по числу горелок в зависимости от паропроизводительности (тепловой мощности) котла.

При выборе числа горелок целесообразно руководствоваться следующими положениями:

- число горелок в ярусах должно быть одинаковым (исключением являются вихревые горелки, расположенные по схеме треугольник с вершиной вверх и вниз);
- в схемах с прямым вдуванием число горелок должно быть кратным числу мельниц;
- в схемах с промбункером число горелок, обслуживаемых одной мельницей, должно быть кратным 2;
- при установке вихревых горелок их число в ярусе должно быть кратным 4;
- при жидком шлакоудалении число ярусов горелок равно 1 или 2;
- для системы ВСС $Z_{\text{др}} \leq 2$;
- чем меньше единичная тепловая мощность горелки, тем ниже выброс оксидов азота и меньше влияние отключения горелки по топливу на топочный режим;
- чем больше горелок, тем сложнее трассировка пиле- и воздухопроводов и организация управления их работы;

Рекомендации по размещению горелок в топке приведены в табл. 3.10.

Шаг между горелками S принимается, исходя из условий обеспечения эжектирования в струю газов в количестве, достаточном для обеспечения стабилизации процесса горения с учетом специфики ввода реагентов.

Таблица 3.7: Рекомендуемые конструкции топок
с твердым шлакоудалением

Расположение горелок	Рекомендуемое топливо	Мощность топочного устройства, МВт
Однофронтальное с вихревыми и плоскофакельными горелками	Каменные угли с выходом летучих $V^r > 12\%$	Для нешлакующих углей до 370
То же с прямоточными горелками ППС	Фрезторф, сланцы	До 235
То же с прямоточными крупносопловыми горелками при прямом вдувании аэросмеси с газовой сушкой	Бурные угли, фрезторф	До 810
Встречное с вихревыми или плоскофакельными горелками	Тощие, бурные, каменные угли	Для каменных и бурных углей до 3100
Тангенциальное с прямоточными и плоскофакельными горелками	Тощие каменные угли ($V^r > 12\%$)	С плоскофакельными горелками до 235 с прямоточными до 3100
Встречносмещенные с прямоточными горелками	Каменные угли ($V^r > 20\%$), бурные угли, сланцы	До 170 при схемах пылеприготовления с прямым вдуванием и 810 при схемах с промбункером пыли
Встречное с крупносопловыми горелками	Каменные угли ($V^r > 20\%$), бурные угли	До 810
С тангенциальным расположением прямоточных горелок при использовании пылеконцентраторов	Бурные влажные угли с $V^r > 50\%$, окисленные бурные угли с повышенной теплотой сгорания летучих (типа бикинских)	До 2100

Таблица 3.8. Рекомендуемые типы топочных устройств мельниц
схемы пылеприготовления и тонкость пыли (ЖЛУ)

Топливо	Топочное устройство	Схема пылеприготов- ления	R_{90} σ	R_{90} σ
1	2	3	4	5
АШ, ПА при $V^r \leq 8\%$	Однокамерные с встреч- ным расположением вих- ревых или плоскофакель- ных горелок	Полуразомкнутая или разомкнутая с промбункером с подачей пыли горячим возду- хом (ШБМ)	7-8	0
	Полуоткрытые с встреч- ным расположением вих- ревых или плоскофакель- ных горелок	Для сжигания планов разомкну- тая схема пыле- приготовления (ШБМ).		
	Полуоткрытые с восьми- гранными предтопками ПО "Сибэнергомаш" с тан- генциальным располо- жением горелок с одно- сторонним вводом воз- духа	То же		
$T, V^r = 8-17\%$ $2CC, V^r = 17-25\%$	То же	Полуразомкнутая с промбункером, подачей пыли горячим возду- хом или ПВК (ШБМ)	10-12	0
Каменные угли	Однокамерные топки с встречным расположе- нием вихревых или плоскофакельных горе- лок, с тангенциальным расположением горелок. Полуоткрытые топки с восьмигранными предтоп- ками ПО "Сибэнергомаш" и тангенциальным распо- ложением горелок	С промбункером и подачей пыли мель- ничным воздухом или ПВК (ШБМ)	15-20	0

Продолжение табл.3.8

1	2	3	4	5
Бурные угли	Полуострый тип топки с восьмигранным предтопками ПО "Сибэнергомаш" и тангенциальным расположением горелок	Полуразомкнутая или разомкнутая с громбункером, газовой сушкой и подачей пыли горячим воздухом или ПБК (ПБМ)	55	I,5
	Однокамерные с встречным расположением вихревых или плоскофакельных горелок с тангенциальным расположением горелок	Полуразомкнутая с пылеконцентратором (ПМ)	55	I,4

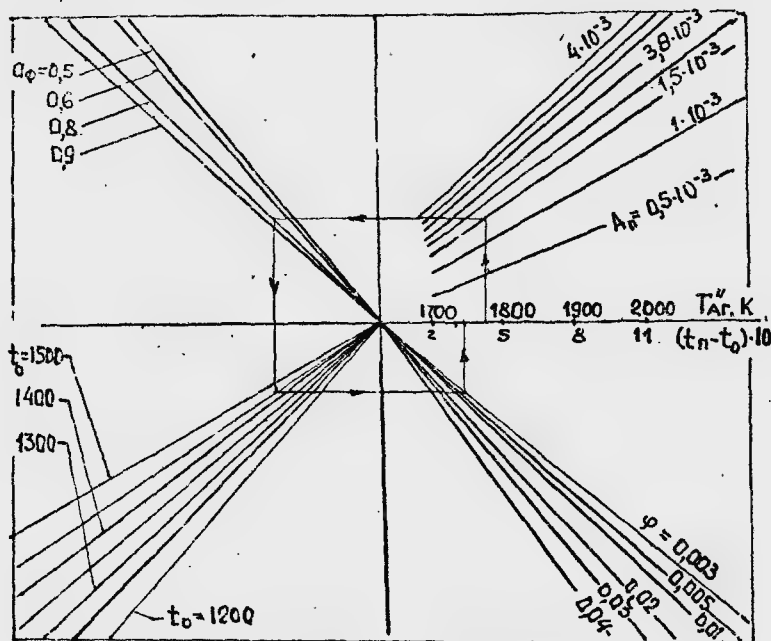


Рис. 3.15. Определение температуры

T_{ag}

Таблица 3.9. Рекомендуемое число горелок на котел при различной тепловой мощности Q_T топки

Расположение горелок	Q_T , МВт										
	50	93	168	235	310	370	580	810	1200	2050	3100
Вихревые горелки											
Однофронтальное	2; 4	4	4; 6	-	-	-	-	-	-	-	-
	2; 4	4	4	4; 8	-	-	-	-	-	-	-
Встречное	4; 6	4; 6	4; 6	6-8	4; 8	8	8; 16	12; 24	16; 24	24; 48	48
	2; 4	4	4	4	4; 8	8	8; 16	8; 16	10; 16	16; 24	24; 32
Прямоточные горелки											
Тангенциальное	4	4	8	8-16	8; 16	8; 16	16-24	24-32	24-32	32; 48	48
	4	4	4	4; 8	4; 8	4; 8	8; 16	8; 16	16	16	-
Встречносмещенное	3; 5	5; 7	7-14	7-14	9-10	9-10	12-16	16-18	-	-	-
Фронтальное	2; 4	3; 4	3; 4	4-9	5-10	5-10	8-10	-	-	-	-
	2; 4	4; 6	4; 8	-	-	-	-	-	-	-	-
Плоскофакельные горелки											
Встречное	-	-	4; 6	6	6; 8	8	8; 16	8; 16	16; 24	24	36
	-	-	4	6	6; 8	8	8	8; 16	16	16	24

Примечание. В числителе даны значения для ТМУ, а в знаменателе — для КМУ.

Таблица 3.10. Компонувочные размеры горелок в топке
в зависимости от способа плакоудаления [1,2]

Наименование	Величина	
	ПлV	ПлV
I	2	3

I. Вокрепные горелки

при встречном или
однофронтальном рас-
положении

Расстояние между ося-
ми горелок S , м,
при одноярусном распо-
ложении

$$[(1,8-2)+0,35n_r] \Delta a$$

$$(1,8+0,2n_r) \Delta a$$

при многоярусном распо-
ложении

$$[(2,0-2,4)+0,35n_r] \Delta a$$

$$(1,8+0,35n_r) \Delta a$$

Расстояние между яруса-
ми по вертикали $h_{яp}$, м

$$\text{Не менее } S$$

$$(0,7-1,0) S$$

Расстояние от крайних
горелок до примыкающих
стен S_1 , м

$$S$$

$$0,7 S$$

Расстояние от оси горе-
лок нижнего яруса до на-
чала ската холодной во-
ронки $h_{гб}$, м

при коридорном располо-
жении

$$(2,0-2,5) \Delta a$$

$$(1,8-2,0) \Delta a$$

при расположении тре-
угольником вниз на бо-
ковых стенах

$$(0,8-1,0) \Delta a$$

$$(0,8-1,0) \Delta a$$

глубина топки b_T , м

$$S (4/n_r + \varphi z_{яp}) C_I$$

$$z_{яp} \quad I \quad 2 \quad 3 \quad 4$$

$$\varphi \quad I \quad 0,75 \quad 0,65 \quad 0,6$$

ширина топки a_T , м

$$[z_r / (C z_{яp}) - 1] S + 2 S_1$$

$C=I$ и $C_I = 0,75$ для однофронтального
расположения горелок и $C = 2$ и $C_I = I$ для
встречного

Продолжение табл.3.10

I	2	3
2.Прямоточные горелки при тангенциальном или блочном расположении ¹⁾		
Ширина амбразуры b , м	(0,07-0,08) G_r для котлов $D < 4000 \text{ т/ч}$ и (0,05-0,06) для $D < 1500 \text{ т/ч}$	
Расстояние от нижней кромки амбразуры нижне- го яруса горелок до на- чала ската холодной воронки или начала пода $h_{гб}$, м:		
при поворотных горелках,	4 b	-
при неподвижных	3 b	(2 - 2,8) b
Высота горелки или горелоч- ного блока h (или $h_{бл}$)	4 b	
Условный диаметр крутки:		
$\bar{d}_{у/г}$,	(0,08-0,10) ²⁾	(0,14-0,8)
Расстояние между горелка- ми по вертикали h_1 , м	2,5 b	
Угол наклона горелок к экрану	Не менее 40°	Не менее 40°
Расхождение между наибольши- ми и наименьшими углами на- клона осей горелок ($Z_{г.р} \geq 6$)	Не более 10°	Не более 10°
3.Прямоточные крупносопловые горелки при встречном или од- нофронтальном расположении ³⁾		
Расстояние между осями горе- лок по горизонтали S , м	(3-3,5) b	

1	2	3
Расстояние от нижней кромки алмазурной горелки до начала ската холодной воронки, м	2,5 b_0	-
4. Плоскощелевая горелка ³⁾		
Расстояние между осями горелок S , м	(4-6) b	(4-6) b
Расстояние от оси крайних горелок до примыкающих стен S_1 , м	(4-6) b	(4-6) b
Глубина топки b_T , м		(12-14) b
Относительная высота горелок h/b	(3-5)	(3-5)
Расстояние от нижнего среза горелки до начала ската холодной воронки или пода $h_{гб}$, м	(3-4) b	(3-4) b
Расстояние между ярусами ⁴⁾	Не менее 8 b	-
5. Встречносмещенная компоновка прямоточных горелок ^{4,5)}		
Простенок между горелками $H = S - b$, м	(0,12-0,16) b_T	(0,18-0,22) b_T
Расстояние между осями горелок S , м	$\geq 3,5 b$	$\geq 4,0 b$
Расстояние от крайних горелок до прилегающих стен S_1 , м	1,7 H	S
Относительная высота горелок h/b	2-5	2-5
Расстояние от горелок нижнего яруса до середины холодной воронки или начала пода	4 h	- 2 h

Продолжение табл. 3.10

1	2	3
6. Плоскопараллельные прямоточные горелки ³⁾		
Калибр горелки b , м	Д, т/ч, 75; 160-210; 210-320 0,35; 0,32-0,4; 0,4-0,45	
Расстояние между горелками по осям S , м	3 b + 0,4, но не менее 1 м	
Относительная высота горелок h/b	4-6 ⁶⁾	
Расстояние от нижней кромки амбразуры до начала ската холодной воронки h_{гв} , м	1-1,5	
Угол наклона горелок к горизонту α , град.	0-10	-(10-15)
Угол наклона осей горелок крайних мельниц к центру топки α₁ , град.	12-18	15-20
Расстояние от оси крайней горелки до боковой стены, м	0,8; 1,5	1,5

Примечания:

- 1) расстояние между осями ярусов горелок помимо указанных в таблице требований должно удовлетворять условию $q_{ag} < [q_{ag}]$;
- 2) для одноярусной компоновки высота горелки;
- 3) ширина и глубина топки определяются из условия $q_F < [q_F]$ при $0,9 < a_T/b_T < 1,2$;
- 4) меньший размер для топок (полутопок) с тепловой мощностью менее 810 МВт;
- 5) величина a_T находится по формуле для вихревых горелок, а b_T - из условия $q_F < [q_F]$;
- 6) помимо указанных размеров необходимо обеспечить нужное значение параметра **W** и условия устойчивости течения (см. 3.1.2);
- 7) большое значение для одноструйных горелок;
- 8) горелки типа ПЮ при ТЛУ компонуются воздушными каналами к отенам топки, а при ЗЛУ - внутрь топки.

Величина бокового простенка S_1 дана с учетом уменьшения влияния наброса факелов крайних горелок при ударе в боковые экраны (встречная компоновка) или вследствие краевого эффекта (встречно-смещенная компоновка).

Минимальное расстояние между ярусами горелок $h_{яг}$ указано в табл.3.10, исходя из условий, обеспечивающих свободу развития струй и исключая появление неустойчивости аэродинамической картины течения в топочном объеме. Значение $h_{яг}$ должно быть увязано с аналогичной величиной, определяемой из условия $q_{яг} < [q_{яг}]$.

Расстояние от горелок нижнего яруса до гниба холодной воронки $h_{гг}$ в топках с ТШУ определяет условия заполнения продуктами сгорания нижней части топки и эффективность ее работы как теплообменной поверхности нагрева.

Для топок с ШШУ расстояние $h_{гг}$ должно, с одной стороны, обеспечить высокие температуры в области летки, а с другой - исключить сепарирование пыли из факела на под. Увеличение содержания горючих в пленке может привести к увеличению вязкости шлака.

Специфика размещения горелок при тангенциальной и встречно-смещенной компоновках подробно оговорена в § 3.1, в, г.

Ширина топки Q_T выбирается, исходя из условия размещения горелок в ряду. Глубина топки b_T должна обеспечивать выгорание основной массы топлива на расстояниях $(0,5-0,6) b_T$.

Значения Q_T , b_T и $h_{яг}$ должны удовлетворять требованиям $q_F < [q_F]$, $q_{яг} < [q_{яг}]$. Кроме того, размеры топки Q_T и b_T не должны превышать размеров, рекомендуемых для котельных ячеек котлов соответствующей паропроизводительности.

При наличии альтернативных вариантов компоновки горелок целесообразно провести их сравнение с целью оценки габаритов топки, среднего уровня зоны максимального тепловыделения, выброса оксидов и др.

3.5. Оценка надежности работы топок с ШШУ по условиям выхода жидкого шлака

Возможность получения жидкого шлака определяется при минимальной тепловой нагрузке зоны активного горения, исходя из условий радиационного теплообмена и передачи теплоты через шлаковую пленку. Минимальная температура газов факела, при которой обеспечивается выход жидкого шлака, K :

$$T_{ф.пл} = \sqrt[4]{\frac{\lambda_{шл} \sqrt[3]{2(e^{\varphi_{шл} \Delta T} - 1) - 2\varphi_{шл} \Delta T - (\varphi_{шл} \Delta T)^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \alpha_k \varphi_{шл} A_n}} + T_n^4. \quad (3.9)$$

Теплопроводность шлака $\lambda_{шл}$, Вт/(м.К), определяется при средней температуре пленки в интервале ΔT от $T_{пл}$ до T_0 , К:

$$\lambda_{шл} = 1,07(1 + 2,5 \cdot 10^{-3}(t_n - 10^3)). \quad (3.10)$$

Параметр, учитывающий вязкость шлака:

$$\varphi_{шл} = \frac{\rho_n M_o / M_{нж}}{t_{нж} - t_o}, \quad (3.11)$$

M_o , $M_{нж}$ - динамическая вязкость шлака при $t=t_o$ и $t=t_{нж}$, Па.с; значения M_o , $M_{нж}$ и $\varphi_{шл}$ для различных топлив даны в [2,3].

Коэффициент тепловой эффективности экранов зоны (камеры) горения

$$\alpha_k = \frac{1}{1/\alpha_{шл} + \chi(1/\alpha_{ф} - 1)} \quad (3.12)$$

Здесь $\alpha_{шл} = 0,68$, $\alpha_{ф}$ - коэффициенты тепловой эффективности шлаковой пленки и факела; значения $\alpha_{ф}$ находятся в соответствии с рекомендациями [3]. Коэффициент экранирования камеры

$$\chi = \frac{H_{лг}}{H_{ст}} \quad (3.13)$$

представляет собой отношение лучевоспринимающей поверхности стен зоны горения $H_{лг}$ к общей поверхности стен этой зоны $H_{ст}$. Значения $H_{лг}$ и $H_{ст}$ рассчитываются с учетом поверхности выходного окна. Для большинства современных топок

$$\chi = \frac{H_{ст} - f_r z_r}{H_{ст}}, \quad (3.14)$$

где $f_r z_r$ - суммарная поверхность амбразур горелок в пределах зоны горения, м².

Параметр

$$A_n = \sqrt[3]{\frac{M_o G_o a_{шл}}{\gamma_{шл}^2 U \cdot p_1 \sin \alpha}} \quad (3.15)$$

M_o - динамическая вязкость шлака при температуре t_o , Па.с;
 G_o - количество вводимой в топку золы, кг/с; $a_{шл}$ - коэффициент шлакоулавливания (см. табл. 3.3);

$\gamma_{шл}$ - плотность шлака, кг/м³ ($\gamma_{шл} = 2200-3050$);
 U - периметр топки, м; α - угол наклона стен экранов в зоне горения (для большинства топок $\alpha = 90^\circ$);

p_1 - коэффициент, учитывающий динамическое воздействие факела на пленку при наличии ярко выраженного вихревого движения газов в камере горения (топки циклонного типа). В зависимости от скорости газов факела W_f , м/с, значение p_1 равно

W_f	0	20	40	60
p_1	I	2-3	6-8	II-17

Меньшие цифры для топлив типа АШ, большие для канско-ачинских углей.

Для кислых шлаков, у которых $t_o < t_{нк}$, при расчете $T_{ф min}$ можно принять $t_n = t_{нк}$. Для основных шлаков при $t_o \approx t_{нк}$ безразмерная разность температур в шлаковой пленке $(t_n - t_o)/T_{гг}$, где $T_{гг}$ - температура газов на выходе из зоны горения, находится по данным рис. 3.15 в зависимости от $T_{гг}$, t_o , $\gamma_{шл}$, A_n .

Анализ соотношения (3.9) показывает, что значение $T_{ф min}$ должно быть тем больше, чем больше значения T_n , $\gamma_{шл}$, U , p_1 и чем меньше M_o , G_o , $a_{шл}$, A_n .

Ниже дан расчет $T_{ф min}$ топлива в основном составом шлаков ($K < 1$).

Пример. Котел, сжигающий назаровский уголь, имеет расход топлива $39 \cdot 10^3$ кг/ч при зольности $A^p = 10,2\%$. Определить $T_{ф.плн}$, если известно, что $M_0 = 0,251$ кгс.с/м²; $t_0 = 1380^\circ\text{C}$; $\gamma_{шл} = 1,9 \cdot 10^{-2}$ л/град; $G_0 = 1,12$ кг/с; $Q_{шл} = 0,35$; $U = 32,5$ м; $\chi = 0,971$; $Q_{ф} = 0,48$; $W_{ф} = 0$; $\alpha = 90^\circ$. Температура газов на выходе из зоны горения $T_{гг} = 1773$ К; $\gamma_{шл} = 2370$ кг/м³.

Результаты расчета

Определяемая величина	Обозначение	Расчетная формула	Результат
Коэффициент тепловой эффективности экранов камеры горения	a_K	(3.12)	$\frac{1}{0,68} + 0,971 \left(\frac{1}{0,48} - 1 \right) = 0,396$
Комплекс	A_n	(3.15)	$\sqrt[3]{\frac{0,25 \cdot 1,12 \cdot 0,35}{2370^2 \cdot 32,5 \cdot 1,1}} = 0,8 \cdot 10^{-3}$
Параметр	$\frac{t_n - t_0}{T_{гг}}$	Рис. 3.15	0,014
Разность температур в пленке	Δt	$t_n - t_0$	$0,014 \cdot 1773 = 25$
Температура поверхности пленки	t_n	$t_0 + \Delta t$	$1380 + 25 = 1405$
Средняя температура шлаковой пленки	$\bar{t}_n$	$t_0 + \frac{\Delta t}{2}$	$1393 + 25 = 1405$
Коэффициент теплопроводности при t_n	$\lambda_{шл}$	(3.10)	$1,07 [1 + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot (1393 - 1000)]$

Минимальная температура факела (по (3.9))

$$T_{ф.мин} = \sqrt[4]{\frac{2 \left(1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 25 - 1 \right) - 2 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 25 - \left(1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \right)^2 + 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,396 \cdot 1,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{}}$$

$$+ 1678 = 1768.$$

Контрольные вопросы к главе 3

1. Назовите область применения каждой из четырех аэродинамических схем сжигания пылеугольных топлив.
2. Каков физический смысл ограничений, вводимых при расчете топок по q_F , $q_{F\Gamma}$, $q_{A\Gamma}$, β_A'' , $T_{\phi, \text{min}}$?
3. Почему ограничивается число ярусов в топках с ШТУ и системе ВСС?
4. Какую компоновку горелок Вы выбрали бы для следующих топлив: подмосковный Б, $Q_T = 160$ МВт; кизеловский, Г, $Q_T = 810$ МВт; донецкий Т, $Q_T = 1200$ МВт?
5. Рассчитайте, приняв необходимые данные, компоновку горелок для котла с $Q_T = 210$ МВт, сжигающего харонорский бурый уголь в режиме ТШУ.
6. Известно, что параметр крутки горелки, имеющей $D_a = 1\text{ м}$, равен $\Pi_T = 2,5$. Кроме того, $\phi_H^p = 20$ МДж/кг; $\beta_p = 15$ кг/с; $[q_{A\Gamma}] = 0,8$ МВт/м²; $[q_F] = 2,5$ МВт/м².
Горелки в количестве 8 штук расположены по фронтальной компоновке. Определите q_T ; β_T и величину $h_{\text{ярг}}$.

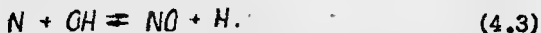
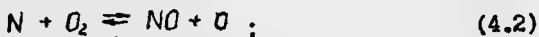
4. ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

При сжигании органических топлив в топках паровых котлов азот, содержащийся в топливе и воздухе, окисляется, образуя оксиды $NO_x = NO + NO_2$. Основная доля образовавшихся в топках котлов NO_x , а именно 95-100%, приходится на оксид азота NO , а оставшая часть - на диоксид NO_2 .

Существуют два принципиально различных источника образования NO . Это - окисление атмосферного (молекулярного) азота воздуха, используемого в качестве окислителя при горении, и окисление азотосодержащих составляющих топлива. В первом случае образуются термические (или воздушные) и "быстрые" оксиды азота, а во втором - топливные NO . Соотношение концентрации термических, быстрых и топливных оксидов азота в общем выбросе NO_x в каждом отдельном случае зависит от содержания связанного азота в топливе, температурного уровня в топке, способа организации топочного процесса и для различных котлов колеблется в достаточно широких пределах. Например, при сжигании природного газа образуются только термические и быстрые оксиды азота, а при сжигании высоковлажных бурых углей в топках с ТЛУ образованием термических NO ввиду невысоких температур горения можно пренебречь.

4.1. Термические оксиды азота

Термические оксиды азота образуются при горении любых топлив в области высоких температур ($T \geq 1800$ K), если в качестве окислителя используется воздух. Окисление молекулярного азота воздуха объясняется термической теорией Я.Б.Зельдовича и происходит по цепному механизму:



Концентрация термического NO интенсивно возрастает от начала зоны горения, достигая наибольшего значения непосредственно за зоной максимальных температур (рис.4.1). В дальнейшем содержание NO не меняется по длине факела, не достигая, однако, равнове-

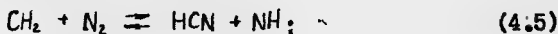
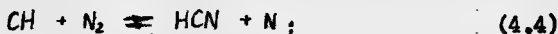
ных концентраций $[NO]_p$.

Наибольшее влияние на эмиссию термических оксидов азота оказывает температура в зоне горения, с увеличением которой происходит экспоненциальный рост образования NO . Увеличение времени пребывания в зоне горения также приводит к росту образования оксида азота. Зависимость выхода NO от коэффициента избытка воздуха α имеет экстремальный вид с максимумом в области значений $\alpha_{кр} = 1,05-1,25$ в зависимости от вида топлива и способа его сжигания.

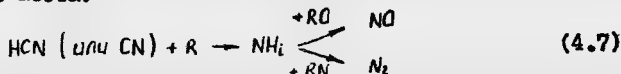
При сжигании твердых топлив в паровых котлах уровень термических оксидов азота, как правило, ниже уровня образовавшихся топливных оксидов азота.

4.2. Быстрые оксиды азота

При сжигании углеводородных топлив замеренная скорость образования NO в зоне горения существенно выше скорости образования термических оксидов азота в послепламенной зоне, оцененной по реакциям (4.1)-(4.3). При этом вблизи зоны горения наблюдались значительные количества цианида водорода HCN (рис.4.2). Такое ускоренное образование NO в корневой части факела (начиная с $T \gg 1400-1600K$) было названо "быстрым" и объясняется реагированием молекулярного азота с углеводородными радикалами, образующимися в промежуточных реакциях горения:



Реагирование цианистых соединений (HCN , CN) далее протекает по следующей схеме с образованием как оксида азота, так и молекулярного азота:



Содержание быстрых оксидов азота в продуктах сгорания углеводородных топлив колеблется от 40 до 200 мг/м³, что, как правило, не превышает 10-20% от суммарного выброса NO_x . Причем максимальные значения быстрых NO_x наблюдаются при горении богатых

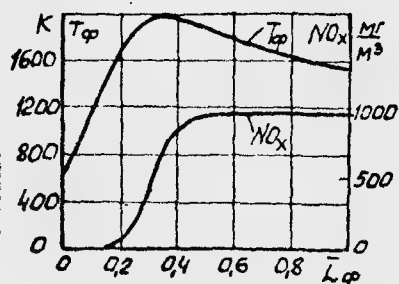


Рис.4.1. Динамика образования термических NO_x в газозудном факеле

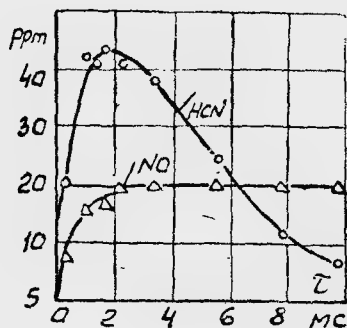


Рис.4.2. Концентрации HCN и NO в пламени этиленовоздушной смеси

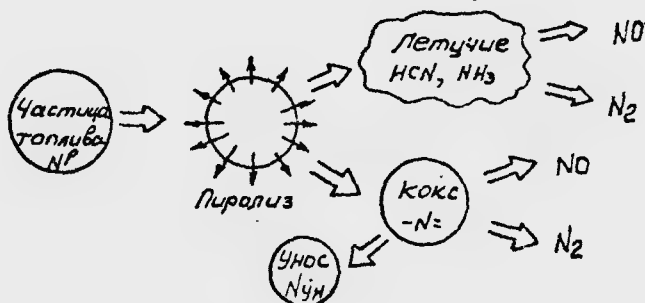


Рис.4.3. Схема образования топливных оксидов азота

смесей ($\alpha_{кр} = 0,7-0,9$) и увеличиваются с ростом температуры в зоне реагирования.

4.3. Топливные оксиды азота

Угли, как правило, содержат значительное количество связанного азота ($N^r = 0,5-3,5\%$). Превращение азотосодержащих соединений твердых топлив в оксиды азота происходит при наличии в зоне реакции достаточного количества кислорода уже при температурах 850-1100 К. Этот процесс можно описать следующей схемой (рис. 4.3). При нагревании поступивших в топочную камеру частиц угольной пыли на начальном участке факела в результате пиролиза топлива и возгонки летучих вокруг угольной частицы образуется газовый объем. Соответственно происходит разделение топливного азота между газовой фазой и коксовым остатком. Большая его часть переходит в газовую фазу в виде аминов и цианидов (в основном NH_3 и HCN). Последние затем реагируют в гомогенных реакциях, образуя в результате оксиды азота и молекулярный азот. Топливный азот, оставшийся в коксе, при догорании коксового остатка также переходит в NO и N_2 , а частично остается в уносе.

Эффективность перехода связанного азота из коксового остатка в NO существенно ниже конверсии газообразных азотосодержащих веществ (типа NH_3 , HCN) в оксиды азота. Поэтому для топлив с приблизительно одинаковым содержанием азота в топливе образование топливных NO тем больше, чем выше выход летучих.

Коэффициент превращения (или степень конверсии) азотосодержащих компонентов топлива в оксиды азота изменяется в зависимости от содержания связанного азота в топливе N^r . При очень низком содержании N^r имеет место почти полная конверсия в NO . Рост содержания N^r до 1-1,3% снижает конверсию до 20-25% в зависимости от температуры и вида топлива.

Влияние температуры на выход топливных оксидов азота в зависимости от температурного диапазона проявляется по-разному. При низких температурах $T < 1300-1400$ К наблюдается быстрый рост топливных NO , а при $T > 1400$ К влияние температуры сказывается значительно слабее. При неизменной температуре выход топливных оксидов азота пропорционален квадрату среднеинтегральной концентрации кислорода в факеле.

Сжигание пыли большинства имеющихся в СССР углей осуществля-

ется, . : правило, при невысоких максимальных температурах 1600-1900К. Образование топливных оксидов азота в основном происходит на стадии выгорания летучих, которая завершается на начальном участке факела. Достигнув определенного значения, концентрация топливных оксидов азота в дальнейшем по ходу факела не изменяется. При таких традиционных для твердых топлив условиях сжигания топливные оксиды азота образуются в количестве около $0,55 \text{ г/м}^3$ на каждый процент содержания азота в топливе.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Как соотносятся между собой количества термических, топливных и быстрых оксидов азота, образовавшихся при сжигании:

а) природного газа; б) твердого топлива?

2. Почему не весь азот, содержащийся в топливе, переходит в NO ?

3. Концентрация оксидов азота при горении органических топлив существенно меньше концентраций продуктов полного сгорания CO_2 и H_2O . Почему же содержание NO_x в димовых газах является одной из важных характеристик парового котла?

4. Почему для разных углей с приблизительно одинаковым содержанием азота в топливе N^p , но с различными характеристиками по выходу летучих образование оксидов азота различно? При сжигании какого угля выход NO_x будет выше?

5. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА

С точки зрения образования оксидов азота факел, в котором происходит выгорание топлива, можно условно разделить на три зоны. В первой с $T < 1700-1800\text{К}$ происходит выгорание летучих и образуются быстрые и топливные NO . Во второй зоне, расположенной по обе стороны от плоскости максимальных температур, происходит образование термических оксидов азота. Третья зона включает хвостовую область факела, где оксиды азота не образуются и концентрация их практически не изменится.

Основными факторами, влияющими на образование оксидов азота, являются: температура и концентрация кислорода в зоне реагирования, время пребывания реагентов в зоне высоких температур и содержание топливного азота. Эти факторы в свою очередь определя-

ются коэффициентом избытка воздуха, конструкцией и компоновкой горелочных устройств, аэродинамическими характеристиками процесса горения, размерами и температурными напряжениями топки и т.д. Поэтому все методы снижения образования NO_x в паровых котлах оказывают влияние на один или несколько из указанных основных факторов.

При сжигании высококачественных углей в топках с жидким шлакоудалением максимальные температуры факела достигают 1650–1750°C. В этих условиях выход NO_x будет определяться образованием как топливных, так и термических оксидов азота. Поэтому основными мероприятиями, снижающими общий выброс NO_x , являются снижение температуры горения (не понижающие надежность выхода жидкого шлака) и избытка воздуха.

Максимальные температуры в топках, предназначенных для сжигания высоковолажных и высокозольных топлив в режиме с твердым шлакоудалением, составляют всего 1300–1450°C. В этих котлах практически все оксиды азота образуются из азота топлива. Поэтому наиболее эффективным для подавления оксидов азота будут мероприятия, направленные на снижение концентрации кислорода в зонах, где происходит воспламенение и горение летучих.

В СССР начата разработка государственной целевой научно-технической программы "Экологически чистая эффективная тепловая электростанция на твердом топливе", в результате реализации которой предполагается снизить выбросы NO_x в атмосферу до 0,15–0,2 г/м³ (при $\alpha_{yx} = 1,4$).

5.1. Конструкции горелочных устройств

Наряду с необходимостью обеспечения устойчивого зажигания и заданной экономичности при отсутствии сепарации пыли и шлакования экранов горелочные устройства должны удовлетворять экологическим требованиям. При факальном сжигании топлив эмиссия оксидов азота существенно зависит от условий смесеобразования. Чем лучше перемешивание топлива и окислителя достигается в горелочном устройстве, тем больше максимальные температуры в ядре горения и тем больше режим горения приближается к кинетическому. Это способствует увеличению образования NO , причем максимум NO соответствует такому избытку воздуха, при котором в данных условиях достигается минимальный механический недожог q_4 .

Топочные факелы подразделяются на вихревые, прямоточные и прямоточно-вихревые.

Вихревой факел характеризуется ранним воспламенением и высокой интенсивностью горения. Благодаря хорошему перемешиванию топлива и воздуха, высоким температурам и локальным теплонапряжениям основная масса (около 80%) оксида азота образуется уже на начальном участке факела на расстоянии 2-3 калибров от входного сечения горелки. Эти же условия способствуют минимальному недожогу. Максимальные концентрации NO_x располагаются за ядром факела на расстоянии 5-6 калибров, и далее по длине факела содержание NO_x в продуктах сгорания остается практически без изменений (рис. 5.1). Образование оксидов азота в вихревом факеле происходит как за счет топливных, так и термических NO_x , причем доля последних в суммарном выбросе NO_x возрастает с ростом температуры.

Прямоточный факел характеризуется большей протяженностью, невысоким уровнем максимальных температур и достаточно равномерным их распределением в объеме факела. Ввиду этих особенностей в прямоточном факеле (по сравнению с вихревым) обеспечивается пониженный выход оксидов азота, которые образуются в основном за счет топливных NO_x (рис. 5.2).

Прямоточные-вихревые факелы в плане образования оксидов азота занимают промежуточное положение между выше рассмотренными видами факелов.

Специфика сжигания угольной пыли определяется сложностью регулирования факела, жесткой зависимостью между устойчивостью горения и режимом работы горелочных устройств, условиями воспламенения и выгорания, температурным уровнем по условиям устойчивости горения и др. Это значительно затрудняет разработку универсального метода подавления оксидов азота, образующихся в топках пылеугольных котлов. Ниже рассмотрены различные конструкции пылеугольных горелочных устройств, применение которых позволяет снизить выбросы NO_x в атмосферу.

а) Горелочные устройства с разделением
потоков вторичного воздуха

Если при горении угольной пыли организовать более поздний подвод вторичного воздуха к аэросмеси на начальном участке факела, то это приведет к затягиванию процессов перемешивания топ-

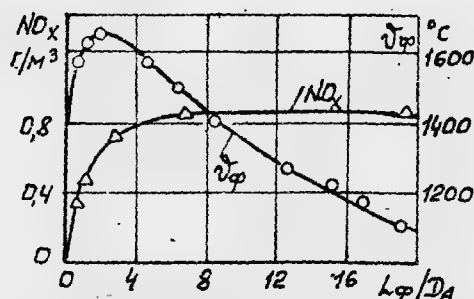


Рис.5.1. Изменение температуры и содержания NO_x по длине факела вихревой горелки при сжигании АIII ($N^p=0,66\%$)

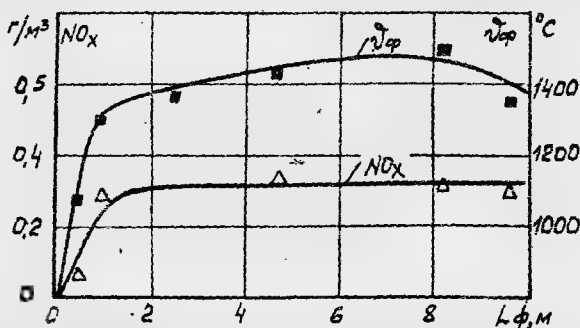


Рис.5.2. Изменение температуры и содержания NO по длине факела прямоточной горелки ($N^p=0,4\%$)

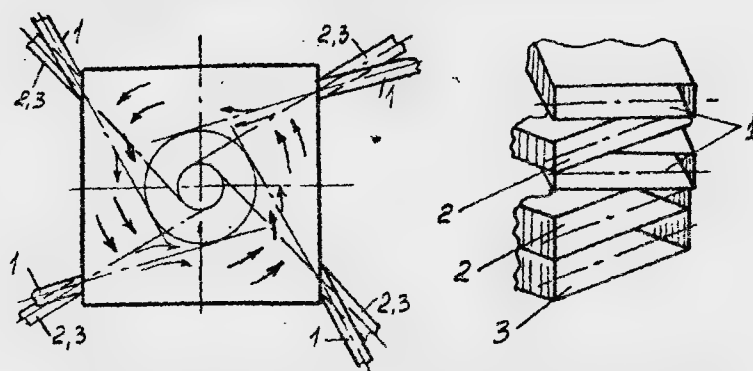


Рис.5.3. Разделение потока вторичного воздуха для котла с тангенциальной топкой: 1 - поток вторичного воздуха (60-80%); 2 - поток вторичного воздуха (20-40%); 3 - поток аэрозольной смеси

лива с воздухом и активного выгорания смеси. В результате такого нестехиометрического сжигания топлива происходит снижение образования топливных и термических оксидов азота.

Указанные условия реализуются в двухточечных (по вторичному воздуху) вихревых горелках (см. рис. 2.2в). В канале аэросмеси такой горелки установлен неподвижный лопаточный аппарат. Вторичный воздух подается по двум коаксиальным каналам с равными расходами. Внутренний канал снабжен неподвижным лопаточным аппаратом и индивидуальным шибером для регулирования расхода воздуха, а внешний канал - регулируемым тангенциальным завихрителем.

Скорость вторичного воздуха во внутреннем коаксиальном канале устанавливается равной скорости аэросмеси для уменьшения интенсивности турбулентного обмена. В процессе эксплуатации не было отмечено ухудшение выгорания топлива по сравнению с вихревыми горелками.

Снижение выхода оксидов азота составляет 15% на котлах с ЭШУ и 20-25% на котлах с ТКУ.

Реализация указанного метода на котле с тангенциальной топкой заключается в установке горелок с разным направлением (в горизонтальной плоскости) потоков аэросмеси и вторичного воздуха (рис. 5.3). Весь вторичный воздух делится на две части. Меньшая часть (20-40%) располагается в нижней части прямоточной горелки и направляется вместе с потоком аэросмеси по касательной к воображаемой окружности в центре топki. Оставшаяся часть вторичного воздуха (60-80%), расположенная в средней и верхней частях горелки, направляется по касательной к воображаемой в центре топki окружности большего диаметра.

Образование оксидов азота снижается на 30-40%. Одновременно можно ожидать шлакования топочных экранов.

б) Горелочные устройства с "экраным" вводом инертных газов

Сущность данного метода заключается в разделении потоков аэросмеси и вторичного воздуха "экраном" из продуктов сгорания. В этом случае горение аэросмеси на начальном участке джакела происходит при низких локальных избытках воздуха ($\alpha_{\text{лок}} \approx \alpha_1 < 1$). Вторичный воздух, необходимый для полного выгорания топлива, подмешивается далее по джакелу.

Указанный принцип реализован в экспериментальной горелке ВТИ-Сибтехэнерго, установленной на котле ТП-61 Новосибирской ТЭЦ-4 (рис.5.4). Горелка оборудована лопаточным завихрителем в канале вторичного воздуха, а в канале аэросмеси установлен неподвижный аксиально-лопаточный завихритель. Ввод дымовых газов выполнен между каналами первичного и вторичного воздуха.

При рециркуляции продуктов сгорания в размере 10% от общего расхода воздуха и избытке воздуха в горелках $\alpha_r = 1,06$ снижение содержания NO_x составило 15-17%. Дополнительное увеличение степени рециркуляции приводит к резкому нарушению устойчивости горения.

Еще большего эффекта можно достичь при реализации "экранного" ввода инертных газов в прямоточных горелках с центральной подачей вторичного воздуха и периферийной подачей аэросмеси. Примером такой конструкции является штегазовая горелка, разработанная на кафедре ИГС МЭИ (рис.5.5). Такая конструкция позволяет снизить образование топливных и термических оксидов азота благодаря следующим процессам. Воспламенение и выгорание природного газа ввиду его высокой реакционной способности происходит на начальном участке распространения факела при локальных избытках воздуха

$\alpha_{\text{лок}} = 1,3-1,4 \gg \alpha_{\text{кр}}$. Это обеспечивает снижение выхода термических NO_x (см. § 1.1). Горение угольной пыли протекает в два этапа. В результате эжекции топочных газов с наружной стороны струй аэросмеси и продуктов сгорания природного газа с внутренней стороны создаются условия для стабильного зажигания потока аэросмеси. При этом горение пыли на начальном этапе происходит при избытке воздуха, существенно меньшем стехиометрического ($\alpha_{\text{лок}} = \alpha'_1 = 0,3-0,5$), ибо горение природного газа на данном участке факела препятствует смешению вторичного воздуха и аэросмеси. После выгорания природного газа оставшийся вторичный воздух смешивается с потоком не полностью выгоревшей угольной пыли и осуществляет ее полное дожигание. Благодаря реализации в данной конструкции принципа двухступенчатого сжигания угольной пыли происходит подавление образования топливных NO_x . Расчеты показали, что в случае сжигания подмосковного угля с природным газом, доля которого по теплу составляет $q_r = 0,25$, снижение выхода оксидов азота достигает 30%.

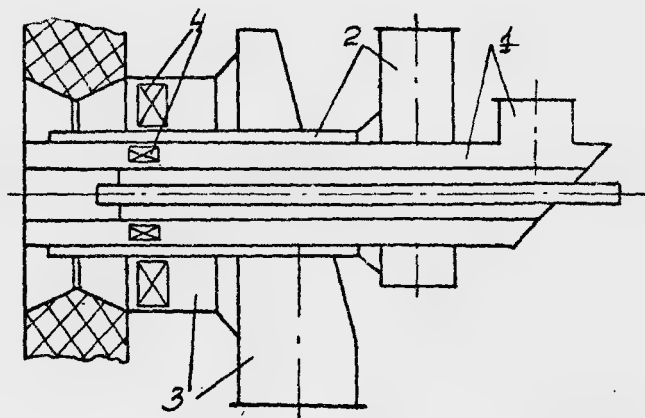


Рис.5.4. Горелка с "экраным" вводом газов рециркуляции:
1 - канал аэросмеси; 2 - канал газов рециркуляции; 3 - канал
вторичного воздуха; 4 - лопаточные аппараты.

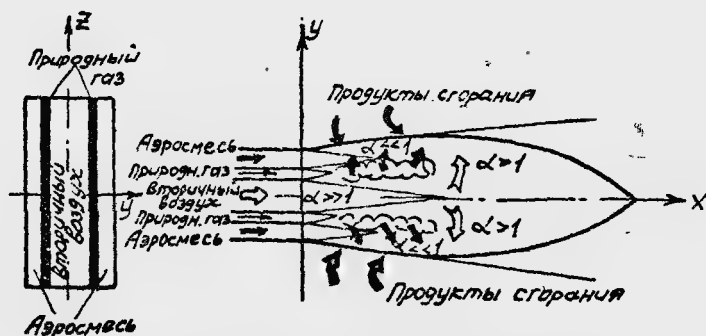


Рис.5.5. Схема прямооточного шпелегазового факела

в) Горелочные устройства с подачей пыли
высокой концентрации

Для котлов, оборудованных пылесистемами с промбункером, снижение образования оксидов азота можно обеспечить заменой обычной системы пылеподдачи к горелкам усовершенствованной системой подачи пыли с высокой концентрацией ($\lambda = 30-50$ кг/кг) под давлением (ПШКд) или под разрежением (ПШКр). Последняя предполагает наличие парового эжектора в выходном сечении горелки в качестве побудителя расхода. ПШК рекомендуется для котлов, сжигающих бурные, каменные и тощие угли, с прямоточными или вихревыми горелками. При сжигании каменных углей в топках с ПШУ следует схему ПШК сочетать с установкой горелок с регулируемой долей первичного воздуха.

На котле ПКЗ-320-140 ПТ Новосибирской ТЭЦ-3 при сжигании назаровского угля были установлены блоки прямоточных горелок с ПШКр (рис. 5.6а). Пыль к горелкам транспортировалась горячим воздухом с температурой 330-365°C.

Вихревые горелочные устройства с ПШКд разработаны для котла П-39-П, работающего на экибастузском каменном угле (рис. 5.6б). Горелка имеет по два канала аэросмеси и вторичного воздуха. Для разделения аэросмеси перед горелкой расположен центробежный пылеконцентратор, внутри которого установлены завихритель с поворотными лопатками и разделительная труба. Слабозапыленный поток аэросмеси из разделительной трубы поступает в наружный канал аэросмеси горелки, а поток с повышенной концентрацией - во внутренний канал.

Применение ПШК позволяет снизить выход оксидов азота на 20-40%.

✓ г) Горелочные устройства ступенчатого сжигания

Метод заключается в разделении воздуха на вторичный и третичный. Вторичный воздух в количестве, необходимом для стабильного зажигания и горения, вместе с аэросмесью подается через основные горелки. На выходе из горелки устанавливается зона горения, обогащенная топливом. Остальной (третичный) воздух через специальные сопла подается далее по факелу за ядром горения. При этом обеспе-

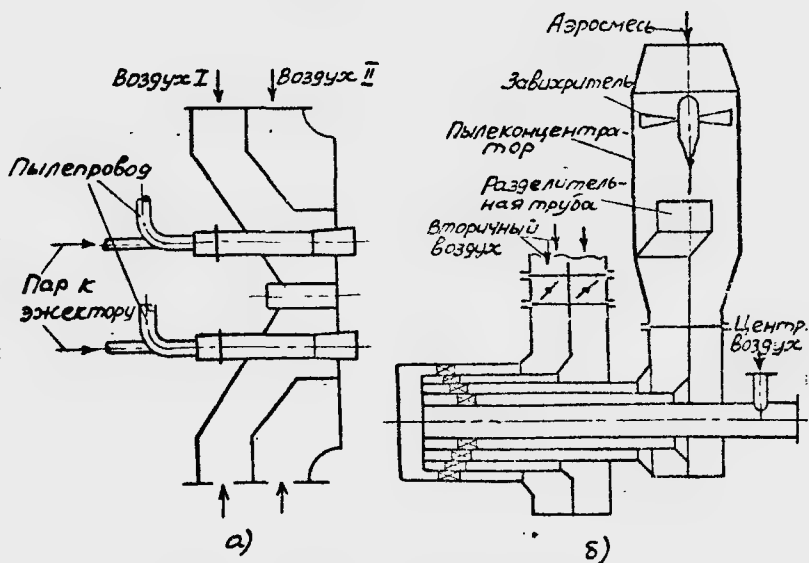


Рис.5.6. Горелочное устройство с ШВК

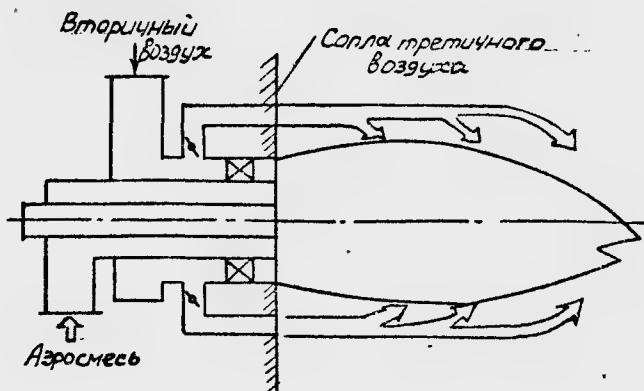


Рис.5.7. Горелка ступенчатого сжигания

чивается полное выгорание топлива без образования у экранов топки зон с восстановительной средой и достигается существенное снижение образования NO_x .

Прямоточные и вихревые горелки ступенчатого сжигания рекомендуется применять на котлах, оборудованных пылесистемами с прямым дуванием или с промбункером при транспорте пыли сушильным агентом.

На рис. 5.7 приведена вихревая горелка ступенчатого сжигания фирмы Steinmuller (СРТ) для котла энергоблока 707 МВт. Аэросмесь подается по центральному кольцевому каналу. Воздух для горения делится на вторичный, подаваемый через наружный кольцевой канал, и третичный, который подается в топку через четыре сопла, размещенные по периферии горелки. В канале вторичного воздуха установлен аксиальный лопаточный завихритель с регулируемой круткой. Струи третичного воздуха обладают достаточным импульсом и на некотором удалении от горелки перемешиваются с основным факелом. Затягивание выгорания угольной пыли не наблюдается. Согласно экспериментальным данным, при сжигании угля с содержанием $N^p = 1,3\%$ образование оксидов азота при номинальной нагрузке и $\alpha_{\text{т}} = 0,9$ снизилось на 40% по сравнению с исходной концентрацией NO_x , равной $1,1 \text{ г/м}^3$.

Прямоточные горелки ступенчатого сжигания внедрены в тангенциальной топке котла БЭС-220-100 на Кузнецкой ТЭЦ. Сопла третичного воздуха прямоугольной формы были установлены на расстоянии 3,38 м над горелками. Оси сопел в плане совпадали с осями тангенциальных горелок и наклонены вниз на 20° (рис. 5.8). При сжигании кузнецкого окисленного угля марки ГР было достигнуто снижение выброса NO_x с $0,8 \text{ г/м}^3$ до $0,45 \text{ г/м}^3$ при $\alpha_{\text{т}} = 1,32$. Содержание горючих в уносе во всех опытах оставалось на прежнем уровне.

Горелки ступенчатого сжигания можно применять на котлах практически любой производительности. Рекомендуемая скорость потока третичного воздуха составляет 40-55 м/с (большие значения для большей производительности). Выходное сечение сопла третичного воздуха может быть как круглым, так и прямоугольным с отношением сторон 2:1. В тангенциальных топках сопла следует располагать над основными горелками, но с направлением вращения, обратным основному факелу. При фронтальной или встречной компоновке горелок рекомендуется встречное расположение сопел третичного воздуха.

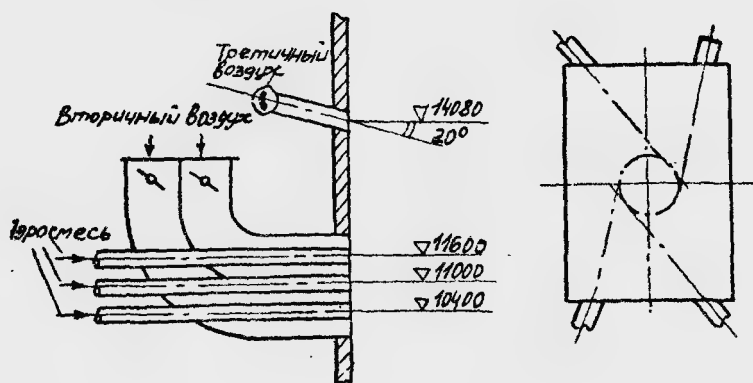


Рис. 5.8. Прямоточная горелка ступенчатого сжигания и схема ее установки в топке котла

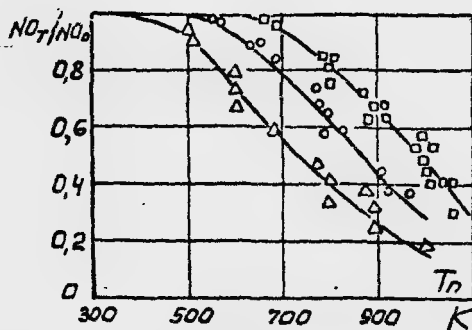


Рис. 5.9. Зависимость степени снижения NO от температуры предварительного подогрева пыли

При установке горелок ступенчатого сжигания наблюдается снижение температуры в зоне первичного горения и повышение температуры продуктов сгорания на выходе из топок. Это вызывает определенные проблемы при регулировании температуры перегретого пара. Если в этих случаях рост температуры перегрева не может быть компенсирован увеличением впрыска или расхода воды на пароохладитель, то при реконструкции котла должна быть сокращена поверхность пароперегревателя.

✓ д) Горелочные устройства с предварительным подогревом угольной пыли

Исследования, выполненные в ВТИ, показали, что при нагреве угольной пыли практически в отсутствие окислителя ($\alpha = 0,05$) до температур $T = 600-1000$ К азотосодержащие газообразные компоненты (типа NH_3 , HCN), вышедшие вместе с летучими, реагируют с образованием в основном молекулярного азота N_2 , а не оксидов азота. Эксперименты подтвердили, что предварительный нагрев угольной пыли до 1000 К снижает образование оксидов азота более чем в 2 раза (рис.5.9). При этом подогрев пыли до температур $T < 550$ К практически не сказывается на образовании NO_x .

Для реализации данного метода в котельной технике была предложена вихревая горелка с предварительным подогревом угольной пыли (рис.5.10). Внутри центрального канала горелочного устройства размещается пламенная труба диаметром 478х8 мм, в которой осуществляется подогрев угольной пыли путем смещения с продуктами сгорания микрофакельной горелки. Эксплуатация горелочного устройства на котле ТП-210А при сжигании кузнецкого угля марок Т и СС в полустырих топках с ШПУ показала, что метод позволяет не только снизить выход NO_x , но также улучшает условия зажигания топлива и выход жидкого шлака.

е) Горелочные устройства прямоточно-ударного типа

В горелках прямоточно-ударного типа, разработанных в МЭИ, аэрозоль двумя потоками направляется в топку через плоские каналы, расположенные по периферии, а вторичный воздух подается по двум каналам, установленным под углом β друг к другу (рис.

2.9), соотношение скоростей $w_2/w_1 = 1,5$. В результате

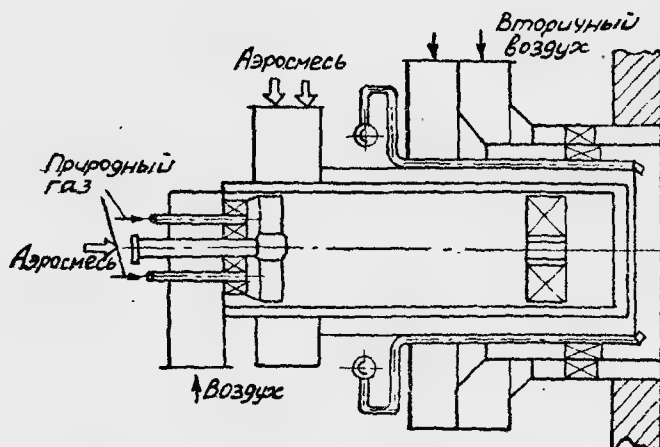


Рис.5.10. Горелка с предварительным подогревом пыли

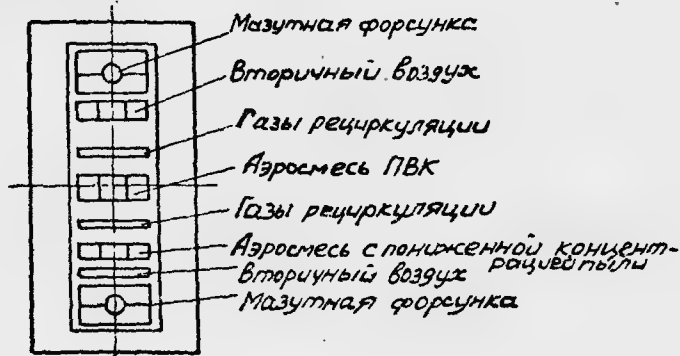


Рис.5.11. Комбинированная прямоточная пылеугольная горелка типа РМ (Япония)

соударения воздушных потоков происходит деформация всей составной пылевоздушной струи с преимущественным раскрытием ее в горизонтальной плоскости.

Для данных горелочных устройств характерны интенсивные процессы перемешивания топлива и окислителя на начальном участке, что создает благоприятные условия для воспламенения аэросмеси. Кроме этого аэродинамическая организация процесса горения отличается интенсивным смещением вытекающих из горелки потоков с топочными газами. В результате имеет место быстрое снижение содержания кислорода вниз по потоку, и дальнейшее выгорание пыли происходит при относительно невысоких температурах факела ($T < 1800\text{K}$). Основное образование оксидов азота в горелках прямоточно-ударного типа наблюдается, согласно расчетным исследованиям, на расстоянии около двух калибров от устья горелки в результате образования топливных NO_x . Согласно расчетным оценкам, выброс оксидов азота при применении прямоточно-ударных горелок может быть снижен до $0,35 - 0,4 \text{ г/м}^3$.

ж) Комбинированные горелочные устройства

Часто в конструкции горелочных устройств реализуется сразу несколько способов подавления оксидов азота. Примером такого подхода является японская РМ-горелка (Pollution Minimum) (рис.5.II). Данное горелочное устройство относится к сложным горелкам прямоточного типа и используется обычно на котлах с тангенциальными топками. Путем установки простейшего инерционного пылеконцентратора в пылепроводе перед горелкой поток аэросмеси делится на высококонцентрированный (ПВК) и низкоконцентрированный. Между этими двумя потоками размещено сопло для ввода газов рециркуляции. Второе сопло для подачи газов рециркуляции расположено между потоками ПВК и вторичного воздуха.

В потоке ПВК воспламенение и горение летучих происходит при доле первичного воздуха, значительно меньшей стехиометрического соотношения. Летучие низкоконцентрированного потока топлива, наоборот, будут выгорать в среде с повышенным избытком воздуха. Такая организация процесса горения топлива способствует глубокому подавлению термических и топливных оксидов азота. Применение РМ-горелок на пылеугольных котлах в добавление к ступенчатому сжиганию позволило снизить выбросы NO_x до $0,18 \text{ г/м}^3$ или почти в 4 раза.

5.2. Режимы работы горелочных устройств

Особенности процесса факельного сжигания топлива в значительной мере определяют эмиссию оксидов азота в топках паровых котлов. Поэтому изменение режима работы горелочного устройства в нужном направлении может привести к снижению выхода NO_x без дополнительных и часто дорогостоящих мероприятий.

а) Избытки воздуха в горелке и в потоке первичного воздуха

✓ Снижение концентрации окислителя в зоне горения топлива подавляет образование как термических, так и топливных оксидов азота. Поэтому сжигание топлив с пониженными избытками воздуха в горелке является одним из самых распространенных способов снижения выхода NO_x . Эффективность метода составляет 20-30% (относительное снижение NO_x) в зависимости от особенностей котла и процесса сжигания (рис.5.12). Кроме того, его реализация позволяет повысить КПД котла на 1-2%.

Недостатками режимов с пониженными избытками воздуха являются возможность появления продуктов неполного сгорания топлива (CO , сажа, канцерогенные вещества), повышение содержания горячих в плаке и уносе, усиление плавления топочных экранов, а также в ряде случаев интенсификация высокотемпературной сульфидной коррозии экранов в топочной камере.

Эффективность метода будет зависеть от совершенства смешения, обеспечиваемого конструкцией горелочных устройств, плотностью ограждений топки и др.

Влияние количества первичного воздуха α_1 на образование оксидов азота определяется типом горелочного устройства (рис.5.12). Так, для вихревых горелок, установленных на котле П-57, зависимость $NO_x(\alpha_1)$ имела минимум при $\alpha_1 = 0,48$. При этом общий избыток воздуха в горелке, температуры аэросмеси и вторичного воздуха поддерживались практически постоянными. Поскольку сечения горелки оставались неизменными, изменение соотношения между потоками первичного и вторичного воздуха приводило к изменению соотношения скоростей потоков w_2/w_1 и параметра крутки сложной струи горелки.

Снижение выхода NO_x при увеличении α_1 в диапазоне 0,12-0,48 (левая ветвь на рис. 5.12б) объясняется ростом скорости потока аэросмеси W_1 и уменьшением разности скоростей ($W_2 - W_1$). В результате ухудшается турбулентный обмен между потоками, и горение аэросмеси протекает без интенсивного подмешивания вторичного воздуха. Спнтты подтвердили, что в этих случаях зона максимальных температур отодвигалась дальше от кромки горелки, т.е. наблюдалось затягивание воспламенения.

Увеличение количества первичного воздуха $\alpha_1 > 0,48-0,5$ (правая ветвь на рис.5.12б) приводит к существенному росту локальных концентраций кислорода в ядре горения и увеличению абсолютной величины разности скоростей ($W_2 - W_1$). Это способствует образованию термических и топливных оксидов азота, так как увеличивается количество окислителя и улучшаются условия его смешения с топливом.

В случае прямоточных горелок, установленных в тангенциальной точке котла БС-210-140Ф, и подачи угольной пыли сушильным агентом рост количества первичного воздуха α_1 сопровождался соответствующим увеличением выхода оксидов азота (рис.5.12). Обработка экспериментальных данных показала, что в этом случае концентрация оксидов азота (в пересчете на NO_2) может быть описана следующим эмпирическим выражением, г/м³:

$$NO_x = 0,62 \alpha_1 + 0,03 (W_2 - W_1) - 0,07. \quad (5.1)$$

Однако влияние первичного воздуха на выход NO_x должно быть более глубоко изучено в зависимости от различных типов горелочных устройств и разных марок углей.

б) Соотношение скоростей потоков вторичного воздуха и аэросмеси

Скоростной режим горелочных устройств (т.е.соотношение W_2/W_1 или разность $W_2 - W_1$, где W_1, W_2 - скорость потоков соответственно аэросмеси и вторичного воздуха) заметно влияет на выход оксидов азота. Однако это влияние не является однозначным и зависит не только от типа горелки, но и способов подачи первичного и вторичного воздуха.

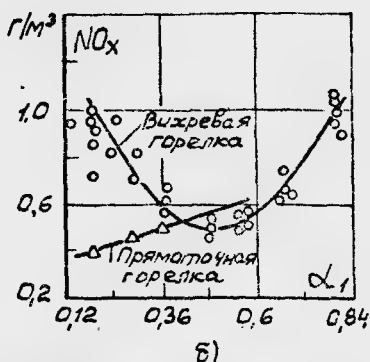
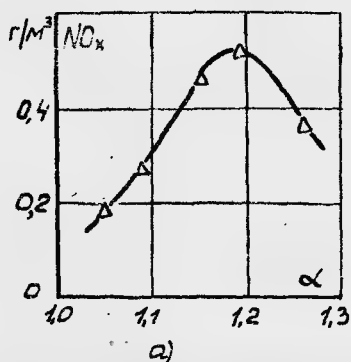


Рис.5.12. Зависимость образования оксида азота от коэффициента: а) избытка воздуха в точке; б) подачи первичного воздуха

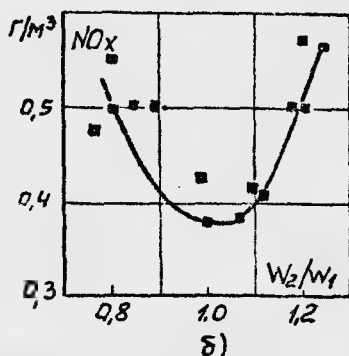
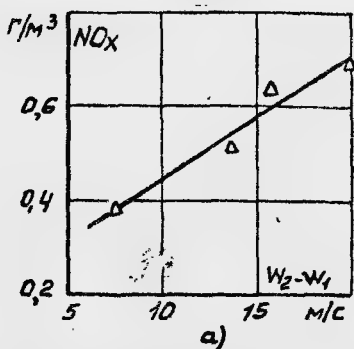


Рис.5.13. Влияние скоростного режима горелочных устройств на выход оксидов азота

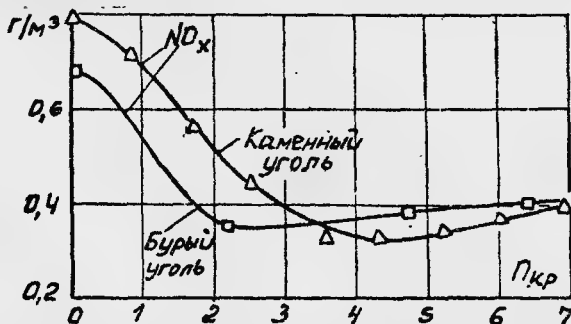


Рис.5.14. Влияние параметра крутки на образование оксидов азота

В общем случае увеличение разности скоростей $|W_2 - W_1|$ усиливает смесобразование спутных потоков и, в свою очередь, горит локальные концентрации кислорода в потоке воспламеняющейся аэросмеси. В примоточных и вихревых горелках с центральной подачей аэросмеси при неизменной величине α_r это приводит к увеличению образования оксидов азота с ростом соотношения $W_2/W_1 > 1$ и с уменьшением соотношения $W_2/W_1 < 1$ (рис.5.13). Путем изменения скоростного режима горелочных устройств можно добиться снижения выхода NO_x на 10-30%.

в) Параметры крутки потоков

Влияние крутки потока вторичного воздуха на эмиссию оксидов азота показано на рис.5.14. Известно, что чем меньше степень крутки, тем длиннее факел. Поэтому при малом значении параметра крутки потока к моменту воспламенения топлива потоки вторичного воздуха и аэросмеси успевают, благодаря турбулентному обмену, значительно перемешаться. В результате горение топлива происходит при избытке окислителя, что стимулирует образование оксидов азота.

С увеличением параметра крутки, благодаря созданию значительной области разрежения внутри конуса факела, зона воспламенения переносится к кромке горелки. В этом случае горение аэросмеси протекает при существенном разбавлении продуктами сгорания из центральной зоны факела и незавершившемся процессе подмешивания вторичного воздуха, т.е. на начальном участке факела образование оксидов азота происходит при локальном избытке воздуха, меньшем стехиометрического. Эти условия способствуют подавлению образования термических и топливных NO_x .

При дальнейшем увеличении параметра крутки $n > 3$ в случае общего избытка воздуха в горелке $\alpha_r > 1$ возможен некоторый рост образования оксидов азота (рис.5.14) в результате увеличения проникновения вторичного воздуха в зону горения. При $\alpha_r < 1$ образование оксидов азота происходит в области, обедненной кислородом. Поэтому изменение параметра крутки в этих условиях практически не влияет на эмиссию NO_x .

При конструировании вихревых горелок с пониженным выходом оксидов азота в основу могут быть положены следующие принципы.

Параметры крутки отдельных потоков, вытекающих из горелочного устройства, должны постепенно уменьшаться в направлении от наружного канала до оси горелки.

Наиболее перспективными среди вихревых горелок являются горелочные устройства с разделением потоков вторичного воздуха. При этом параметр крутки потока вторичного воздуха внутреннего канала рекомендуется брать равным $n_2^{\delta n} = (0,75-0,85) \cdot n_2$, где n_2 - параметр крутки струи вторичного воздуха.

Перечисленные принципы в наибольшей степени реализуются в конструкциях горелочных устройств типа ГПД и ГВД, двухпоточных по вторичному воздуху.

г) Температура горячего воздуха

Уменьшение температуры горячего воздуха приводит к снижению температурного уровня в топке, что в свою очередь уменьшает выход оксидов азота в основном благодаря подавлению образования термических NO . Практика показывает, что при снижении подогрева горячего воздуха происходит уменьшение образования термических оксидов азота в 1,2 раза на каждые $50^\circ C$ снижения $t_{r,3}$ (рис. 5.15). Однако для большинства пылеугольных котлов при уменьшении температуры горячего воздуха на $40-50^\circ C$ максимальные температуры в топке снижаются всего на $15-20^\circ C$.

Данный способ снижения оксидов азота не может быть рекомендован для топок с ТПУ. В них максимальная температура факела обычно не превышает $1400^\circ C$, и поэтому выход NO , определяется образованием топливных оксидов азота. Снижение температуры горячего воздуха для топок с ТПУ весьма нежелательно, так как ухудшает стабильность воспламенения и эффективность сгорания угольной пыли.

Для топок с ЭПУ снижение температуры горячего воздуха для уменьшения выбросов NO , как правило, также не может быть рекомендовано в связи с необходимостью обеспечения надежного выхода жидкого шлака. Исключения могут составлять только отдельные котлы с полустырытыми топками, с вихревыми или циклонными предтопками, в которых температура факела в нижней части топки существенно превышает температуру нормального жидкого шлакоудаления $t_{н.ж}$.

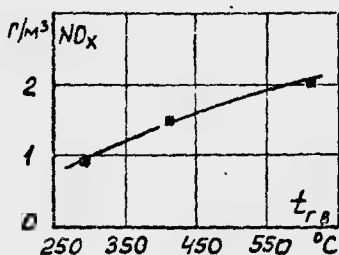


Рис.5.15. Влияние температуры горячего воздуха на выход NO_x

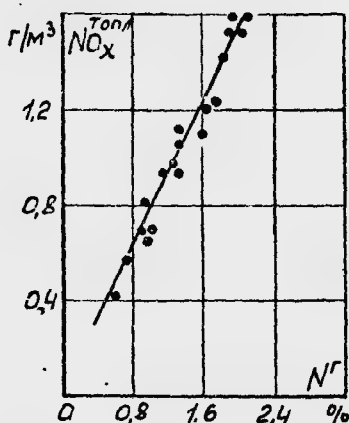


Рис.5.16. Влияние содержания топливного азота на выход NO_x

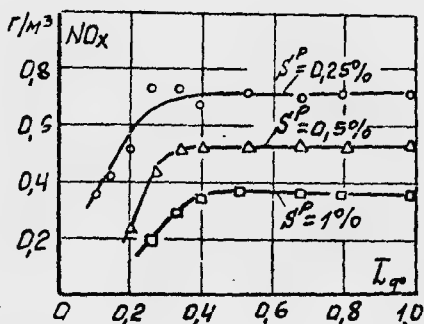


Рис.5.17. Влияние содержания серы на эмиссию оксидов азота

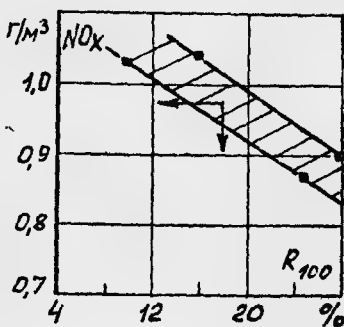


Рис.5.18. Зависимость выхода NO_x от фракционного состава угольной пыли

5.3. Свойства топлива

Среди характеристик топлива наибольшее влияние на выход оксидов азота оказывают содержание азота в топливе N^P , выход летучих V^P , влажность топлива W^P , содержание серы S^P и тип угля.

С ростом содержания материнского азота в топливе происходит увеличение образования NO_x . При этом для различных углей конечная концентрация оксидов азота практически линейно зависит от N^P (рис. 5.16).

В период выхода летучих при прогреве топлива часть азота топлива переходит в газовую фазу в виде аммиака NH_3 и циануда водорода $HSCN$. Причем чем больше выход летучих, тем больше материнского азота переходит в газообразное состояние. Известно, что 80-85% топливных оксидов азота образуются в результате газофазных реакций и только 15-20% в результате гетерогенных реакций окисления азота в коксовом остатке. Поэтому рост выхода летучих способствует увеличению образования NO_x . Так, например, при сжигании кузнецких углей марок ГЖ ($V^P = 33,7\%$, $N^P = 2,2\%$) и 2 СС ($V^P = 19,7\%$, $N^P = 2,0\%$) при практически одинаковом содержании азота в топливе концентрации NO_x в газовом потоке составили соответственно 780 ppm и 520 ppm.

Увеличение влажности топлива W^P в ряде случаев может быть причиной повышенного выхода NO_x . Объясняется это тем, что при сжигании влажного топлива затягивается процесс воспламенения аэросмеси. В результате до момента воспламенения топлива потоки аэросмеси и вторичного топлива успевают перемешаться в большей степени, чем в случае сжигания сухого топлива, которое воспламеняется значительно раньше. Горение летучих, в том числе и азото-содержащих газообразных компонентов (NH_3 , $HSCN$), происходит в среде, более обогащенной кислородом, что способствует эмиссии оксидов азота. Температура факела с ростом влажности сжигаемого топлива снижается незначительно и потому практически не может влиять на процесс образования NO_x .

При сжигании серосодержащих топлив отмечается зависимость концентрации оксидов азота в продуктах сгорания от содержания серы в топливе S^P , что связано с сильным химическим сродством серы к кислороду. Сера, как одна из горючих компонент топлива,

в процессе горения интенсивно "захватывает" атомы кислорода, образуя различные оксиды серы SO , SO_2 и SO_3 и конкурируя тем самым с процессами окисления топливного и атмосферного азота. В связи с этим рост содержания серы в топливе приводит к снижению образования NO_x . При содержании серы в топливе $S^P > 2\%$ влияние серы на выход оксидов азота приобретает менее резкий характер (рис. 5.17).

С ростом степени метаморфизма углей продукты их пиролиза будут содержать большее количество тяжелых углеводородов и смол. Топливный азот в таких продуктах находится в связанном состоянии в виде гетероциклических соединений с высокими значениями энергии связи. Поэтому, как правило, при сжигании бурных углей при прочих приблизительно одинаковых условиях выход оксидов азота несколько выше, чем при сжигании каменных углей.

Экспериментально было установлено, что изменение гранулометрического состава пыли при сжигании в потоке перемешанной пылевоздушной смеси не влияет на выход NO_x . Однако в диффузионном факеле изменения тонкости помола пыли может привести к перемещению зоны выхода летучих в область большего или меньшего смещения аэросмеси со вторичным воздухом и вследствие этого повлиять на образование оксидов азота. Опыт показал, что во всех случаях сжигания топлива с повышенным содержанием грубой пыли концентрация NO была на 10-15% ниже, чем при сжигании тонкой пыли (рис. 5.18).

В отдельных литературных источниках также указывается, что при прочих равных условиях выход NO больше в случае сжигания сильношлакующих углей по сравнению с малошлакующими топливами.

5.4. Компоновка горелочных устройств

Компоновка горелочных устройств в топочной камере парового котла оказывает существенное влияние на образование оксидов азота. В пылеугольных котлах реализуются фронтальная, встречная, встречносмещенная и тангенциальная компоновки, причем горелочные устройства располагаются как в один, так и в несколько ярусов.

Компоновка горелок в топке (наравне с конструкцией последней) определяет аэродинамическую организацию процесса сжигания топлива, местоположение в топке зоны активного горения и ее тепловую нагрузку $q_{\text{лг}}$, кВт/м². Эти факторы в конечном

итоге будут определять количественный выход оксидов азота. При этом эмиссия топливных оксидов азота в большей степени зависит от условий смешения вытекающих из горелки потоков как между собой, так и с окружающими струей продуктами сгорания, т.е. от аэродинамической картины течения. Образование же термических оксидов азота в большей мере определяется тепловым напряжением в зоне активного горения. На рис.5.19 приведена зависимость концентрации NO_x для котла, в котором сжигание высококачественного каменного угля организовано в топке с ЦД.

Выход оксидов азота при тангенциальной компоновке горелок, ввиду невысоких теплонпряжений к специфической аэродинамике процесса смешения топлива, значительно ниже, чем для аналогичной по мощности топки с фронтальной компоновкой (рис.5.20). Сличие в конечном выходе NO при реализации в топочной камере тангенциальной и встречной компоновок горелочных устройств не столь существенно и определяется конкретными условиями тепло- и массообмена в топке.

Многоярусная компоновка горелочных устройств позволяет увеличить размеры зоны активного горения при одновременном снижении теплонпряжений $q_{гг}$. Однако среднее время пребывания в области высоких температур при этом несколько возрастает. Величина конечного выхода оксидов азота в этом случае будет зависеть от того, влияние какого из этих определяющих факторов (снижение $q_{гг}$ или увеличение времени пребывания) окажется решающим.

В последние годы в связи с возросшей актуальностью экологических проблем различные компоновки горелочных устройств (в первую очередь встречные и многоярусные расположения) используются для организации в топочной камере различных вариантов нестехиометрического и ступенчатого сжигания топлива. Нестехиометрическое сжигание реализуется в результате перераспределения воздуха (или реже топлива) между горелками, установленными на противоположных стенах топки, или по ярусам горелок. Ступенчатое сжигание осуществляется благодаря использованию всех или части горелок верхнего яруса для подачи третичного воздуха, необходимого для полного сгорания топлива. Снижение выбросов оксидов азота при реализации нестехиометрического и ступенчатого сжигания составляет 30-50%. При этом практически не происходит ухудшения экономичности топочного процесса. Преимуществом данного ме-

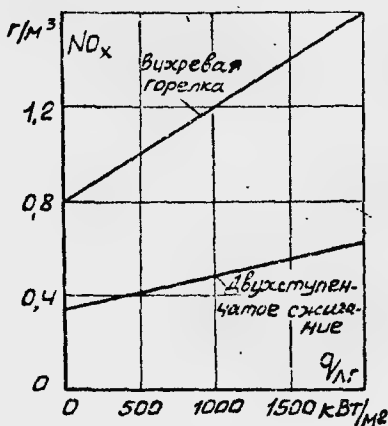


Рис.5.19. Влияние теплонпряжения на эмиссию оксидов азота

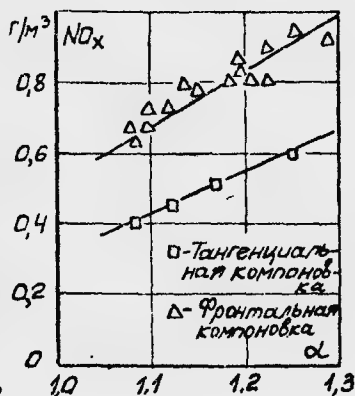


Рис.5.20. Выход оксидов азота в зависимости от компоновки горелок

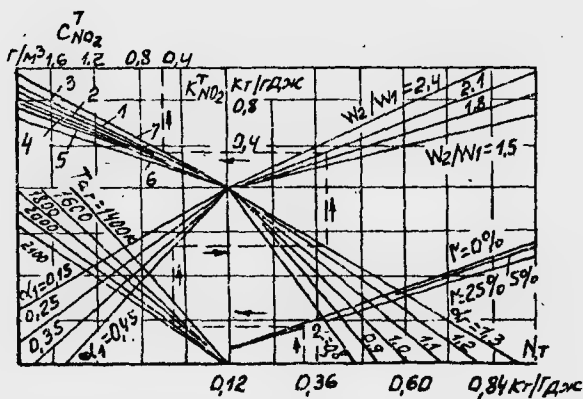


Рис.6.1. Номограмма для расчета концентраций топливных оксидов азота при установке прямоточных горелок (обозначения см.рис.6.3)

тогда является отсутствие дополнительных капитальных затрат, так как его осуществление почти не требует реконструкции действующего оборудования.

Контрольные вопросы к главе 5

1. В каком факеле (прямоточном или вихревом) при одинаковом расходе одного и того же твердого топлива доля термических оксидов азота в общем выбросе NO_x будет выше?
2. Какие мероприятия можно реализовать для уменьшения выхода оксидов азота, не меняя конструкции горелки и топки?
3. Какие негативные явления могут возникнуть при двухступенчатом сжигании топлива, которое используется как один из методов подавления образования NO_x ? Как их избежать?
4. Как организовать закрутку потоков сложной коаксиальной струи, чтобы выход оксидов азота был минимален? Докажите правильность своего суждения.
5. В каких топках (ТШУ и КШУ) при сжигании березовского угля выход оксидов будет больше? Чем это объясняется, если производительность котлов с указанными топками одинакова?
6. Какие из рассмотренных в данной главе способов снижения образования оксидов азота, на Ваш взгляд, являются наиболее универсальными и экономичными?
7. Каким образом выход летучих влияет на образование оксидов азота?
8. Каким основным требованиям должно удовлетворять горелочное устройство?

6. РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУЛОВЛЯЮЩИХ КОТЛОВ

Количество образующихся оксидов азота зависит от характеристик топлива, режимных условий и конструктивного исполнения топочной камеры. Поэтому для паровых котлов необходимо провести расчет ожидаемых выбросов оксидов азота и предусмотреть меры по снижению их до величин, максимально приближающихся к санитарным нормам допустимой загазованности атмосферного воздуха. Для этих целей используют "Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов" (МУ 34-70-051-88), которые устанавливают порядок и методы расчета выбросов NO_x при проекти-

ровании новых и реконструкции действующих котлов.

Исходными данными, необходимыми для расчета при факельном сжигании твердых топлив, являются содержание азота в топливе N^P , % ; теплота сгорания топлива Q_H^P , МДж/кг ; тип горелок; коэффициент избытка воздуха в горелках α_r ; доля первичного воздуха по отношению к теоретически необходимому α_1 ; степень рециркуляции димовых газов через горелки r_r , % ; отношение скоростей в выходном сечении горелок w_2/w_1 ; присосы в топке $\Delta \alpha_7$; доля третичного воздуха, подаваемого в топку помимо горелок $\Delta \alpha_3$; доля соросного воздуха при транспорте пыли горячим воздухом $\Delta \alpha_{ср}$; температура за зоной активного горения $T_{сз}$, К .

Удельные выбросы оксидов азота K_{NO_2} складываются из топливных $K_{NO}^{тпл}$ и воздушных $K_{NO_2}^{взд}$ оксидов азота:

$$K_{NO_2} = K_{NO_2}^{тпл} + K_{NO}^{взд} \quad (6.1)$$

Топливные оксиды азота определяются выражением

$$K_{NO_2}^{тпл} = 0.7 \cdot N_T \cdot \xi_{\alpha_r} \cdot \xi_{\alpha_1} \cdot \xi_{r_r} \cdot \xi_{w} \cdot \xi_{ср}, \quad (6.2)$$

где $N_T = 10 \cdot N^P / Q_H^P$ - содержание азота в топливе, кг/ГДж ;

ξ_i - коэффициенты, учитывающие влияние различных факторов (см.табл. 6.1).

Таблица 6.1

Фактор, учитываемый коэффициентом	Зависимость	Область определения
1	2	3
Влияние α_r в вихревой горелке $\xi_{\alpha_r}^{вхр}$	$(0,35 \cdot \alpha_r + 0,4)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
Влияние α_r в прямой горелке $\xi_{\alpha_r}^{прм}$	$(0,53 \cdot \alpha_r + 0,12)^2$	$0,9 \leq \alpha_r \leq 1,3$
Влияние доли первичного воздуха ξ_{α_1}	$1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$	$0,24 \leq \alpha_1 \leq 0,41$
Влияние рециркуляции димовых газов в горелку ξ_{r_r}	$1 - 0,016 \sqrt{r_r}$	$0 \leq r_r \leq 30\%$

Продолжение табл.6.I

I	2	3
Влияние максимальной температуры на участие образования топливных оксидов азота $\} \beta$	$0,11 \sqrt{T_{ar}'' - 1100}$	$1250K \leq T_{ar}'' \leq 2050K$
Влияние смесеобразования в корне факела вихревых горелок $\} \begin{matrix} \beta_{exp} \\ \beta_{cm} \end{matrix}$	$0,4(w_2/w_1)^2 + 0,32$	$1,0 \leq w_2/w_1 \leq 1,5$
Влияние смесеобразования в корне факела прямоточных горелок $\} \begin{matrix} \beta_{прм} \\ \beta_{cm} \end{matrix}$	$0,98(w_2/w_1) - 0,47$	$1,5 \leq w_2/w_1 \leq 2,4$

Примечание: влияние избытка первичного воздуха на выход определяется суммарным эффектом от изменения избытка воздуха $\} \alpha_{ar}$ и соотношения скоростей на выходе из горелки $\} \beta_{cm}$.

При транспорте пыли к горелкам высокой концентрации значение $K_{NO_2}^{33A}$, рассчитанное по формуле (6.2), умножается на коэффициент 0,8.

Эмиссия воздушных оксидов азота определяется в основном интегральными параметрами топочного процесса, а не особенностями горелок. Поэтому для расчета $K_{NO_2}^{33A}$ используется зависимость, учитывающая уравнение Я.Б.Зельдовича:

$$K_{NO_2}^{33A} = 1,54 \cdot 10^{16} \sqrt{\frac{\alpha_{ar}'' - 1}{\alpha_{ar}}} \cdot \frac{\exp(-67000/T_{ar}'')}{\sqrt{T_{ar}''}}, \quad (6.3)$$

где T_{ar}'' - температура на выходе из зоны активного горения, К;
 α_{ar} - коэффициент избытка воздуха в зоне активного горения, условно принимаемый как сумма организованно подаваемого воздуха и присосов через нижнюю часть топочной камеры, т.е.

$$\alpha_{ar} = \alpha_r + \frac{1}{2} \Delta \alpha_r + \Delta \alpha_{сбр} + \Delta \alpha_z \quad (6.4)$$

Уравнение (6.3) справедливо в диапазоне коэффициентов избытка воздуха $1,05 \leq \alpha_{ar} \leq 1,4$ и при $1800K \leq T_{ar}'' \leq 2050K$. При $T_{ar}'' < 1800K$ образованием термических оксидов азота (т.е. величиной $K_{NO_2}^{33A}$) можно пренебречь.

Температура в конце зоны активного горения $T_{ог}''$ рассчитывается по нормативному методу теплового расчета.

Концентрацию оксидов азота в уходящих газах C_{NO_2} , г/м³, рекомендуется при сжигании твердых топлив пересчитывать на $\alpha_{yx} = 1,4$, а при сжигании газа и мазута - на $\alpha_{yx} = 1,167$. Для этого используется следующее выражение:

$$C_{NO_2} = K_{NO_2} \cdot (Q_H^p / V_r) , \quad (6.5)$$

где $V_r = V_r^o + (\alpha_{yx} - 1) \cdot V^o$ - объем дымовых газов при рекомендуемом значении коэффициента избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} ;

V_r^o и V^o - объемы соответственно дымовых газов и воздуха при стехиометрическом сжигании.

Количественные значения выбросов оксидов азота M_{NO_2} , г/о, рассчитываются по удельным выбросам или по концентрации оксидов азота:

$$M_{NO_2} = B_p \cdot Q_H^p \cdot K_{NO_2} , \quad (6.6)$$

$$M_{NO_2} = B_p \cdot V_r \cdot C_{NO_2} , \quad (6.7)$$

где B_p - расчетный расход топлива, кг/с (м³/с).

Приближенный расчет количества выбросов топливных и воздушных оксидов азота $K_{NO_2}^{тпл}$ и $K_{NO_2}^{взд}$, а также их концентраций $C_{NO_2}^{тпл}$ и $C_{NO_2}^{взд}$ в пересчете на коэффициент избытка воздуха, $\alpha_{yx} = 1,4$ можно выполнить по номограммам, приведенным на рис. 6.1 - 6.3.

В качестве примера в табл. 6.2 приведены расчеты образования NO_x для котла БКЗ-420-140-5, работающего на экибастузском СС.

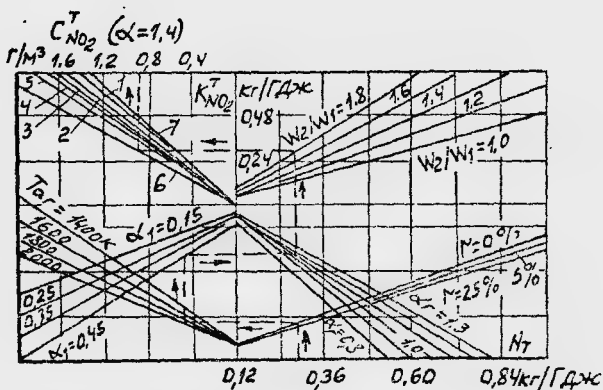


Рис.6.2. Номограмма для расчета концентраций топливных оксидов азота при установке вихревых горелок (обозначения см.рис.6.3)

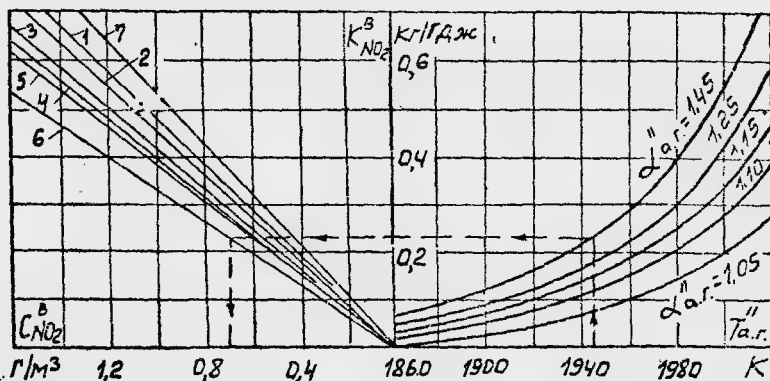


Рис.6.3. Номограмма для расчета концентраций воздушных оксидов азота: 1- бикинский Б2; 2-подмосковный Б2; 3-канско-ачинские угли, гусиноозерский Б3; 4 - азейский Б3; 5 - донецкие АШ, ТЩ, ТЩ, кузнецкий Д, Г, 2СС, экибастузский СС, керитрынский СС, карагандинский Ш; 6 - кузнецкий Е, К, СС, Ш; 7 - торф

Таблица 6.2. Пример расчета удельных выбросов и концентрации оксидов азота при сжигании твердого топлива

Рассчитываемая величина	Формула или обоснование	Варианты			
		I	2	3	4
		базовый режим	с рециркуляцией газов	изменение доли α_1	ступенчатое сжигание
I	2	3	4	5	6
Марка угля	Техническое задание или эксплуатационные данные	Экибаотузский СС			
Содержание азота в топливе $N^P, \%$	То же			0,8	
Теплота сгорания топлива $Q_H^P, \text{МДж/кг}$	То же			15,87	
Приведенная величина содержания азота в топливе $N_T, \text{кг/ГДж}$				0,504	
Тип горелок	Описание котла	Вихревые			
Коэффициент избытка воздуха в горелках α_r	Тепловой расчет, эксплуатационные данные	1,20	1,20	1,20	1,00
Доля первичного воздуха α_1	То же	0,3	0,3	0,35	0,36
Степень рециркуляции газов $r, \%$	То же	0	10	0	0
Температура за зоной активного горения $T_{ar}, \text{К}$	Тепловой расчет	1830	1820	1830	1820
Отношение скоростей на выходе из горелки w_2/w_1	Тепловой расчет или эксплуатационные данные	1,48	1,48	1,15	1,22

I	2	3	4	5	6
Присосы в топке $\Delta\alpha_r$, третичное дутье $\Delta\alpha_3$	То же	0	0	0	0,20
Избыток воздуха в зоне активного горения α_{or}	$\alpha_r + \frac{\Delta\alpha_r}{2} + \Delta\alpha_3$	1,2	1,2	1,2	1,2
Влияние избытка воз- духа в горелке $\sum \alpha_{ef}$	$(0,35\alpha_r + 0,4)^2$	0,67	0,67	0,67	0,563
Влияние доли первичного воздуха $\sum \alpha_1$	$1,73 \cdot \alpha_1 + 0,48$	1,0	1,0	1,086	1,10
Влияние рецирку- ляции газов $\sum \gamma_r$	$1 - 0,016 \sqrt{\gamma_r}$	1,0	0,995	1,0	1,0
Влияние темпе- ратур на обра- зование топлив- ных $\sum \gamma$	$0,11 \sqrt[3]{T_{br} - 1100}$	0,99	0,986	0,99	0,986
Влияние смесе- образования $\sum \gamma_{см}$	$0,4 \left(\frac{W_2}{W_1} \right)^2 + 0,32$	1,196	1,196	0,849	0,93
Топливные оксиды азота, $K_{NO_2}^{тпа}$ кг/ГДж	Формула (6.2)	0,28	0,277	0,216	0,200
Воздушные оксиды азота, $K_{NO_1}^{вза}$ кг/ГДж	Формула (6.3)	0,022	0,017	0,022	0,017
Суммарное значе- ние, K_{NO_2} кг/ГДж	$K_{NO_2}^{тпа} + K_{NO_2}^{вза}$	0,302	0,294	0,238	0,217
Концентрация оксидов азота в дымовых га- зах при нормаль- ных условиях и $\alpha = 1,4$, C_{NO_2} , г/м ³	$K_{NO_2} \cdot \frac{Q_p}{V_r}$ $V_r = 6,15 \frac{м^3}{кг}$	0,78	0,76	0,615	0,517

Контрольные вопросы к главе 6

1. Почему ввод газов рециркуляции в горелочное устройство явля-
ется малоэффективным для подавления оксидов азота при сжигании
твердых топлив?

2. Почему при $T_{gr}'' < 1800$ К образованием термических оксидов азота в расчетах выбросов NO_x можно пренебречь?
3. Почему значение доли рециркуляции продуктов сгорания никогда не превышает 30%?
4. Почему расчетное содержание NO_x при сжигании твердых топлив по рассмотренной выше методике рекомендуется пересчитывать на $\alpha_{yx} = 1,4$?

Рекомендуемая литература

1. Проектирование топок с твердым шлакоудалением /Под ред. В.В.Митора и Ю.Л.Маршака. Л.: Центр.котло-турб.ин-т, вып.42, 1981. 132 с.
2. Проектирование топок с жидким шлакоудалением / Под ред. Ю.Л.Маршака и В.В.Митора. М.:Всесоюз.теплотех.ин-т, 1983. 101 с.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод)/ Под ред. Н.В.Кузнецова. М.:Энергия,1973. 295 с.
4. Ахмедов Р.Б. Аэродинамика закрученной струи. М.:Энергия, 1977. 240 с.
5. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. М.:Энергоатомиздат, 1989. 356 с.
6. Айзен Б.Г., Ромашко И.Е., Сотников И.А. Горелочные устройства котлов ЗиО. М.:Энергоатомиздат, 1984. 142 с.
7. Тепловые и атомные электрические станции: Справочник Т.3. / Под ред. В.А.Григорьева и В.М.Зорина. Изд.2-е. М.:Энергоатомиздат, 1989. 698 с.
8. Росляков Г.В. Токсичные продукты сгорания ТЭС и ограничение их выброса в атмосферу. М.:Моск.энерг.ин-т, 1986. 58 с.
9. Котлер В.Р. Оксиды азота в дымовых газах котлов. М.: Энергоатомиздат,1987. 144 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	
1. ВЫБОР СПОСОБА ШЛАКОУДАЛЕНИЯ	4
1.1. Общие положения	4
1.2. Факторы, влияющие на выбор способа шлакоудаления	7
2. ПЫЛЕУТОЛЬНЫЕ ГОРЕЛКИ	16
2.1. Вихревые горелки	16
2.2. Прямоточные горелки	27
2.3. Соединение горелок с топкой	37
3. КОМПОНОВКА ГОРЕЛОК И ТЕПЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПОК	40
3.1. Аэродинамика пылеутольных топок	40
3.2. Тепловые характеристики топок	54
3.3. Оценка надежности работы топок с ТШУ по температуре на выходе из зоны горения	61
3.4. Компоновка горелок в топке	63
3.5. Оценка надежности работы топок с ТШУ по условиям выхода жидкого шлака	72
4. ОБРАЗОВАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ	77
4.1. Термические оксиды азота	77
4.2. Быстрые оксиды азота	78
4.3. Топливные оксиды азота	80
5. ВЛИЯНИЕ СПОСОБА СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА НА ЭМИССИЮ ОКСИДОВ АЗОТА	81
5.1. Конструкции горелочных устройств	82
5.2. Режимы работы горелочных устройств	95
5.3. Свойства топлива	101
5.4. Компоновка горелочных устройств	102
6. РАСЧЕТ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ АЗОТА ДЛЯ ПЫЛЕУТОЛЬНЫХ КОТЛОВ	105
Рекомендуемая литература	113

Михаил Александрович Изюмов
Павел Васильевич Росляков

Учебное пособие
по курсу

"Парогенераторы"

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГОРЕЛОК

(Кафедра парогенераторостроения)

Редактор издательства Н.Н.Толченова

Темплан издания МЭИ 1990 г. (I), поз.42 (учебн.)
Подписано к печати 06.03.90г.

Формат 60х84/16

Физ. печ. л. 7,25

Усл. печ. л. 6,74

Уч.-изд. л. 8,8

Тираж 800 Изд. №55 Заказ 2139

Цена 20 коп.

Типография издательства МЭИ

Красноказарменная, 13